



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

PROYECTO FIN DE CARRERA

# MODELIZACIÓN y SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL SECADO SOLAR DE MICROALGAS

Ingeniería Industrial Superior

Especialidad en Tecnologías Energéticas

Autor: Ángel Sánchez-Fuentes Santos

Tutor: Lucía Blanco Cano

Leganés, Julio de 2016



# Agradecimientos

*Gracias a Lucía Blanco, mi tutora en éste proyecto. Sin su ayuda ni sus conocimientos en la materia el proyecto no habría salido adelante. Han sido muchas horas, correos, gráficas y datos en estos meses, pero el resultado espero haya merecido la pena.*

*Gracias a mi madre Alicia y mi hermano Carlos, por su apoyo incondicional en éstos últimos meses y durante tantos años de carrera. Sin vuestro cariño y apoyo la carrera y el proyecto hubieran sido mucho más difíciles de lograr, y yo no sería quien soy ahora si no fuera en gran parte por vosotros. Éste trabajo os lo dedico a los dos.*

*Gracias a Claudia, por aparecer en mi vida hace casi 3 años y por su incansable apoyo y ánimo durante todo éste tiempo. Eres la culpable de gran parte de los éxitos que he logrado, espero compartir los que nos quedan a tu lado.*

*Quiero dar las gracias a mis amigos de carrera Leiva, Toril, Yiyi, Alberto, Ojos, Andrés, Jorge, Deivid, Marco, Nico, Gino, Miki, Dacal, Gonfal, Tragus, Trescan,...y los que me olvido, han sido los mejores años, y he hecho amistades para toda la vida. Gracias por estar siempre cuando se os necesita.*

*Gracias también a todas las personas que me han apoyado o que han compartido algún momento de estos años conmigo, familiares, amigos del colegio, mi familia erasmus...gracias a todos.*

*Para Jara y Chula, no menos importantes,*

# Resumen

**Palabras clave:** colector solar, proceso de secado, transferencia de calor, microalgas, modelo matemático, simulación.

El objetivo de éste proyecto es desarrollar un modelo matemático y una simulación numérica que permita simular el comportamiento de la temperatura y la pérdida de humedad (entre otras variables) de microalgas sometidas a un proceso de secado solar. La energía térmica empleada en éste proceso puede proceder de cualquier fuente de calor. En nuestro caso se integra un colector solar de aire como fuente de calor, que dará una temperatura variable a la entrada de la cámara de secado, logrando así evitar un consumo eléctrico o el uso de un combustible.

El secado es un proceso térmico que se basa en el intercambio de masa (agua) y energía (calor) entre el producto a secar (alga) y el medio de procesamiento o fluido de secado (aire). Es necesario conocer los mecanismos de transferencia de calor y de masa asociados para poder diseñar un proceso térmico más económico y eficiente.

Cuando el mecanismo del proceso de secado es bien comprendido, se puede desarrollar un modelo matemático que lo represente. Para ello, se usó una geometría del producto en forma de bandeja rectangular ó lote individual conocido como ‘batch’, como las empleadas en el secado de productos alimenticios, lechos...ésta geometría se consideró como un lote único y se estableció un volumen de control de estudio que abarcaba el interior de la cámara de secado (capa de aire y capa de algas en contacto).

Se partió de las curvas experimentales de la humedad del alga respecto al tiempo tomadas de la bibliografía, para temperaturas de entrada constantes conocidas. Se estudió la cinética del secado de las algas para una  $T$  de entrada variable (la del aire que sale del colector solar), calculando la derivada de la curva de la humedad con el tiempo, es decir, la velocidad de secado que corresponde a cada valor de humedad, para cada temperatura. Aplicando una serie de ajustes polinómicos a las curvas de humedad, velocidad, etc. se consiguió la expresión de la velocidad de secado en función de la temperatura variable de entrada al secador. A partir de las condiciones iniciales (producto con 100% de humedad y temperatura inicial) se calcula la velocidad de secado inicial, y el resto de valores se calcularán resolviendo las ecuaciones asociadas de forma cíclica durante todo el proceso. La velocidad de secado permite calcular la variación de humedad del alga con el tiempo, necesaria para el cálculo de las ecuaciones presentes en los balances de calor y masa.

Como se ha explicado, en el proceso de secado de microalgas aparecerá un intercambio de calor y masa entre alga-aire, por lo que se tendrán que desarrollar las ecuaciones propias de éstos balances para el volumen de control considerado antes. Mediante una discretización de éste volumen de control en el dominio del tiempo, se han estudiado dichos balances para cada instante de tiempo  $p$ , gracias a el desarrollo de las ecuaciones asociadas y el estudio de las variables que aparecen en ellas.

A base de repetir las mismas ecuaciones una y otra vez tantas veces como instantes de tiempo  $p$  se indiquen, se obtiene el modelo matemático propuesto, que representará el comportamiento de las temperaturas y humedades (además de otras variables) en cada instante de tiempo, en función de una temperatura de entrada al secador variable. El modelo se simuló numéricamente utilizando la herramienta informática MATLAB®.

Al final se hace una valoración energética y económica, dando una estimación del tiempo de amortización de la instalación y el ahorro económico que supondría ésta tecnología.

## Abstract

**Keywords:** solar collector, drying process, heat transfer, microalgae, mathematical model, simulation,

The purpose of this Project is to develop a mathematical model and a numerical simulation that allows to simulate the temperature behaviour and the moisture loss (among other variables) of microalgae subject to a process of solar drying. The thermic energy employed in this process may come from any source of heat. In this case, a solar collector of air is integrated as a heat source that will provide a variable temperature to the drying chamber, avoiding an electric consumption or fuel employment.

The drying is a thermic process based on the exchange of mass (water) and energy (heat) between the product to be dried (algae) and the process medium or the drying fluid (air). It is necessary to know the transfer mechanism of associated heat and mass in order to design a more economical and efficient thermic process.

Once the drying process mechanism is understood, a mathematical model that represents it may be developed. To that end, it was used a geometry of the product in a rectangular tray form or individual batch, as the ones employed in the drying of food products and beds among others. This geometry was considered as a single batch and a study control volume that comprises the inside of the drying chamber (air layer and algae layer in contact) was established.

The starting point was the experimental curves of the algae moisture over the time, taken from the bibliography, to constant, known, entry temperatures. The kinetics of the algae drying for a variable entry  $T$  (the one of the solar collector outgoing air) was studied calculating the derivate of the moisture curve over the time, that means, the drying speed that corresponds to each moisture value, for each temperature. Applying a series of polynomial adjustments to the moisture curves, speed etc. the drying speed expression, according to the variable entry temperature to the dryer, was achieved. From the initial conditions (product with 100% of moisture and initial temperature) the initial drying temperature is calculated, and the other values will be calculated by solving the equations cyclically throughout the process. The drying speed allows to calculate the moisture variation of the algae over the time, it is necessary for the calculation of the present equations in the heat and mass balances.

As explained, in the microalgae drying will appear an exchange of heat and mass and algae-air, so we may develop the strict equations of those balances for the volume of control aforesaid. Through a discretization of this volume of control in the domain of time, for each instant of time  $p$  the abovementioned balances have been studied with the help of the development of the associated equations and the study of the variables that appear in the equations.

Repeating the same equations again and again, as many times as time instant  $p$  is indicated, the proposed mathematical model is achieved, representing the temperature and moisture behaviour (in addition to other variables) in each instant of time, according to the entry temperature to the variable dryer.

The model was numerically simulated using the computer toll MATLAB®. Finally an energetic and economical assessment is done, providing an estimation of the amortization period of the system and the economic savings that this technology may involve.



# Índice general

## I MEMORIA

### 1. Introducción

1.1. Motivación y objetivos del proyecto .....	13
1.2. Metodología del proceso de trabajo .....	14
1.3. Recursos empleados .....	15
1.4. Organización del documento .....	16
1.5. Conceptos previos necesarios .....	17

### 2. Marco Teórico

2.1. Microalgas, fundamento y concepto	
2.1.1. ¿Qué son las microalgas? Tipos y Características .....	18
2.1.2. Razones para el uso de las microalgas .....	20
2.1.3. Las microalgas en la actualidad .....	23
2.1.4. Elección de la especie para su posterior uso en el caso práctico.....	26
2.2. El proceso de secado	
2.2.1. Introducción. El proceso de secado, etapas y factores .....	27
2.2.2. Sistemas de secado .....	31
2.2.3. Tipos de secadores .....	37
2.3. Secadores solares	
2.3.1. Introducción, concepto y funcionamiento.....	42
2.3.2. El colector solar, características y tipos .....	42
2.4. Modelado y simulación de procesos	
2.4.1. Concepto y objetivos .....	46
2.4.2. Herramienta empleada en el modelado y la simulación de procesos.....	47
2.4.3. Ejemplos y aplicaciones del Modelado y la Simulación.....	48

## II CASO PRÁCTICO.-MODELADO Y SIMULACIÓN

### 3. Modelado y simulación numérica del secador de algas

3.1. Descripción del caso práctico .....	51
3.2. El Modelo matemático .....	56
3.2.1. Obtención de las ecuaciones .....	56
3.2.2. Diagrama de flujo.....	70
3.3. La Cinética del Secado .....	72

## **4. Cálculos numéricos y procedimiento**

4.1. Cálculos en el colector solar.....	86
4.2. Cálculos en secadero .....	92

## **5. Representación y análisis de los resultados**

5.1. Variables del proceso de secado.....	108
5.2. Estudio energético y económico.....	124

## **III CONCLUSIONES**

<b>Conclusiones</b> .....	130
---------------------------	-----

## **IV BIBLIOGRAFÍA**

<b>Referencias</b> .....	132
--------------------------	-----

## **V ANEXOS**

**Código del proceso programado en MATLAB®**

**Hoja especificaciones técnicas**



# Índice de figuras

<i>Figura 1. Estructura y esquema básico del proyecto .....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2. Fotografía de Spirulina sp.. Microalga usada en tratamientos de alergias, anemias, enfermedades cardiovasculares y virales. [2] .....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3. Localización de las compañías alrededor del mundo produciendo biocombustibles a partir de microalgas [15] .....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4. Humedad de equilibrio higroscópico (Fuente:www.fao.org Ingeniería Poscosecha I) .....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 5. Región de entrada en una tubería para flujo interno [27] .....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 6. Secador de bandejas [29] .....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 7. Secador de tambor giratorio por corriente de aire [30] .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 8. Secador de lecho fluidizado [31] .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 9. Secador neumático para industria química [32] .....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 10. Secador en spray [33] .....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 11. Esquema básico de un colector plano de energía solar [34] .....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 12. Componentes de un colector solar [36] .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 13. Esquema completo del caso práctico,(Autocad) .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 14. Dimensiones del secador a tener en cuenta (Autocad) .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 15. Dimensiones bandeja de microalgas (Autocad) .....</i>	<i>54,97</i>
<i>Figura 16. Diagrama básico para la creación del modelo matemático .....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 17. Detalle para el balance de masa en el alga .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 18. Detalle para el balance de masa en el aire .....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 19. Detalle volumen de control aire y alga .....</i>	<i>64,98</i>
<i>Figura 20. Detalle para el balance de energía en el aire .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 21. Detalle para el balance de energía en el alga .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 22. Diagrama de Flujo del proceso .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 23. Parejas de tiempos y humedades generadas en MATLAB® .....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 24. Detalle MATLAB® tiempos para 30 grados centígrados, en segundos .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 25. MATLAB®-Ventana de ajuste de una gráfica .....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 26. 1º Coeficientes Humedad30 vs tiempo30 .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 27. 1º Coeficientes para 30, 50, 70 y 90°C .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 28. Derivada para 30°C .....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 29. Derivadas para 30, 50, 70 y 90°C .....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 30. 2º Coeficientes Humedad30 vs derivada30 .....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 31. Vectores con los coeficientes del 2º ajuste, para las 4 temperaturas .....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 32. Vectores con los 3 coeficientes d1,d2 y d3 .....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 33. Vectores con los coeficientes de los ajustes de d1,d2 y d3 .....</i>	<i>84</i>

# Índice de tablas y gráficas

Tabla 1. Productos obtenidos a partir de microalgas [3] .....	20
Tabla 2. Contenido de lípidos en distintas microalgas [12] .....	22
Tabla 3. Mayores productores mundiales de bioetanol (Millones de barriles equivalentes de petróleo por día) [16] .....	25
Tabla 4. Temperaturas ambiente medias, irradiación media y horas del mes de Junio [40] .....	87
Tabla 5. Energía aportada por el colector cada hora del día .....	124

## Gráficas

Gráfica 1. Relación experimental de humedades con el tiempo a temperaturas de 30,50,70 y 90°C [39] .....	72
Gráfica 2. Variación de las humedades vs tiempo para 30, 50, 70 y 90°C .....	74
Gráfica 3. Humedad 30°C vs tiempo 30°C con ajuste polinómico de grado 3 (CUBICO) .....	76
Gráfica 4. Humedad 30°C vs tiempo 30°C con ajuste EXPONENCIAL .....	76
Gráfica 5. Ajuste con polinomio grado 2 para 30 °C .....	80
Gráfica 6. Ajuste con polinomio grado 2 para 50 °C .....	80
Gráfica 7. Ajuste con polinomio grado 2 para 70 °C .....	80
Gráfica 8. Ajuste con polinomio grado 2 para 90 °C .....	81
Gráfica 9. Ajuste d1 vs Temperatura .....	83
Gráfica 10. Ajuste d2 vs Temperatura .....	83
Gráfica 11. Ajuste d3 vs Temperatura .....	83
Gráfica 12. Tambiente junio media (°C) vs tiempo(horas) .....	87
Gráfica 13. Irradiación solar media (W/m2 vs tiempo(horas) .....	87
Gráfica 14. Toutcolector (K) vs tiempo(s) para flujo 0.075 kg aire/s por bandeja .....	89
Gráfica 15. Toutcolector (K) vs tiempo(s) para flujo 0.028 kg aire/s por bandeja .....	90
Gráfica 16. Toutcolector (K) vs tiempo(s) desde las 7:00 AM y flujo 0.075 kg aire/s por bandeja .....	91
Gráfica 17. Ajuste curva tiempo vs Toutcolector a polinomio de grado 5 .....	91
Gráfica 18. Temperatura a la salida del colector solar ajustada a polinomio grado 5, desde 7AM .....	92
Gráfica 19. Humedad MR del alga vs tiempo caso1 .....	109
Gráfica 20. Humedad MR del alga vs tiempo caso1 .....	109
Gráfica 21. Temperatura del aire Ta vs tiempo caso1 .....	110
Gráfica 22. Temperatura del alga Tp vs tiempo caso1 .....	110
Gráfica 23. Detalle instantes iniciales, diferencia entre Ta y Tp vs tiempo caso1 .....	110
Gráfica 24. Toutcolector vs tiempo caso1.1 .....	111
Gráfica 25. Humedad MR vs tiempo caso1.1 .....	111
Gráfica 26. Detalle instantes iniciales Ta vs tiempo caso1.1 .....	112
Gráfica 27. Detalle instantes iniciales Tp vs tiempo caso1.1 .....	112
Gráfica 28. Ta y Tp vs tiempo caso1.1 .....	112
Gráfica 29. Toutcolector vs tiempo caso2 .....	113
Gráfica 30. Humedad MR vs tiempo caso2 .....	113

Gráfica 31. Temperatura del aire $T_a$ vs tiempo caso2.....	113
Gráfica 32. Temperatura del alga $T_p$ vs tiempo caso2.....	113
Gráfica 33. Toutcolector vs tiempo caso3.....	114
Gráfica 34. Humedad MR vs tiempo caso3.....	114
Gráfica 35. Temperatura del aire $T_a$ vs tiempo caso3.....	115
Gráfica 36. Detalle instantes iniciales Temperatura del aire $T_a$ vs tiempo caso3.....	115
Gráfica 37. Temperatura del alga $T_p$ vs tiempo caso3.....	115
Gráfica 38. Detalle instantes iniciales Temperatura del alga $T_p$ vs tiempo caso3.....	115
Gráfica 39. irradiación media ( $W/m^2$ ) vs horas del día.....	116
Gráfica 40. Toutcolector vs tiempo caso4.....	116
Gráfica 41. Humedad MR vs tiempo caso4.....	116
Gráfica 42. Detalle instantes iniciales Temperatura del aire $T_a$ vs tiempo caso4.....	117
Gráfica 43. Temperatura del aire $T_a$ vs tiempo caso4.....	117
Gráfica 44. Detalle instantes iniciales Temperatura del alga $T_p$ vs tiempo caso4.....	117
Gráfica 45. Temperatura del alga $T_p$ vs tiempo caso4.....	117
Gráfica 46. Toutcolector según $\dot{m}_{airecolector}$ a lo largo del tiempo caso5.....	118
Gráfica 47. Humedad MR lecho algas a lo largo del tiempo, con $\dot{m}_{airecolector}$ caso5..	119
Gráfica 48. Temperatura del aire $T_a$ vs tiempo caso5.....	120
Gráfica 49. Temperatura del alga $T_p$ vs tiempo caso5.....	120
Gráfica 50. Toutcolector vs tiempo caso6.....	121
Gráfica 51. Humedad MR vs tiempo caso6.....	121
Gráfica 52. Temperatura del aire $T_a$ vs tiempo caso6.....	121
Gráfica 53. Temperatura del alga $T_p$ vs tiempo caso6.....	121
Gráfica 54. Toutcolector vs tiempo caso7.....	122
Gráfica 55. Humedad MR vs tiempo caso7.....	122
Gráfica 56. Detalle $T_a$ vs tiempo en instantes iniciales caso7.....	123
Gráfica 57. Variación $T_a$ a lo largo del t caso7.....	123
Gráfica 58. Detalle $T_p$ vs tiempo en instantes iniciales caso7.....	123
Gráfica 59. Variación $T_p$ a lo largo del t caso7.....	123

# **Parte I**

# **MEMORIA**

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Motivación y objetivos del proyecto

El proceso de secado es una de las principales técnicas para la eliminación del agua presente en los materiales. Su uso tiene sus orígenes en antiguas civilizaciones del planeta y es la técnica más usada para reducir la humedad a lo largo de los años. El secado también llamado deshidratación, consiste en la eliminación del agua contenida dentro del material, usualmente por medios térmicos.

Con el secado se busca de preservar el producto en condiciones estables y seguras, reduciendo su cantidad de agua y modificando sus características para transformarlo en un producto final más adecuado a las necesidades que se requieran. La eliminación de agua que consigue el proceso de secado genera la pérdida de peso de los productos y la disminución del volumen a ocupar por los mismos cuando son transportados y almacenados, disminuyendo de esta manera los costos de almacenamiento y distribución.

#### Objetivos del Proyecto

El proyecto nace en el departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III de Madrid, y tiene como objetivos principales realizar la modelización del proceso de secado solar de microalgas, así como la simulación numérica en MATLAB® de los procesos de transferencia de calor y masa que van asociados.

Se realizará un estudio del comportamiento y características que experimenta una mezcla de microalgas al someterla a un proceso de secado dentro de un secadero de bandejas o secadero ‘batch’ por el que se hace circular aire calentado previamente en un colector solar integrado en la instalación, de ésta forma la energía solar está muy presente en el proceso de secado de las microalgas.

Gracias a la simulación numérica llevada a cabo mediante el software informático MATLAB® y al desarrollo de las ecuaciones de transferencia de calor y masa que intervienen en el proceso, se ha conseguido un modelo genérico que nos permitirá conocer qué ocurre después del secado, pudiendo elegir las características iniciales a la entrada en función de la cantidad de “alga seca” que queramos obtener al final del proceso, o en función de la energía que usemos para mover el aire que circula por su interior, etc.

Con éste estudio se pretende conocer cómo se ven afectadas variables del aire, del alga, dimensiones...a lo largo del tiempo según varían las condiciones a la entrada. Se podrán estudiar la temperatura (del alga y del aire), la humedad/contenido en agua, flujo de aire, dimensiones del secadero, etc.

Al mismo tiempo éste trabajo busca poder estudiar la eficiencia energética del proceso y dar una estimación del ahorro económico que supondría una instalación de éstas características. Queremos acercar el uso de las tecnologías limpias a todos los públicos y promover las microalgas como una de las materias primas del futuro a la que se le están encontrando gran cantidad de usos fuera del sector alimenticio. En el siguiente esquema se introduce la estructura básica que tendrá el proyecto:

### ESQUEMA BÁSICO DEL PROYECTO

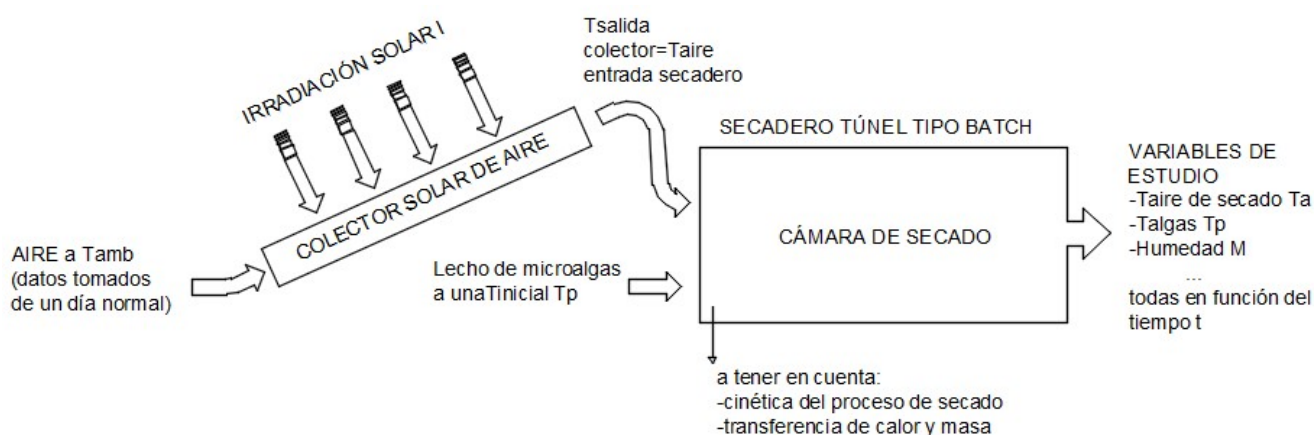


Figura 1. Estructura y esquema básico del proyecto

Se creará un modelo con cálculos numéricos y desarrollo de ecuaciones que al simularse a lo largo del tiempo  $t$  permita reproducir correctamente los procesos de calentamiento de aire en el colector y el secado de las microalgas dentro del secadero, generando los valores de una serie de variables que son interesantes estudiar.

## 1.2 Metodología del proceso de trabajo

Para la elaboración y desarrollo del presente documento se siguió el siguiente orden de actuación:

MARCO TEÓRICO y EXPLICACIÓN DE CONCEPTOS - ELECCIÓN DEL CASO PRÁCTICO –MODELADO y SIMULACIÓN NUMÉRICA – ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se trata de un proyecto que trata temas muy presentes en la actualidad tecnológica que vivimos, por lo que en primer lugar es necesario recopilar y leer una gran cantidad de información, documentos, artículos de revistas especializadas, libros o cualquier tipo de bibliografía que podamos encontrar junto con documentación en la red. Es necesario evaluar la información obtenida y optimizarla, separar lo más útil y realizarse un esquema mental que nos permita desarrollar el proyecto de la forma más lógica y entendible.

En segundo lugar se debe aplicar lo explicado en la teoría a un caso práctico que permita mostrar la utilidad del trabajo, logrando obtener conclusiones que ayudarán en menor o mayor medida a estudiar el proceso de secado de las algas a próximos estudiantes e investigadores. Para ello sería de ayuda buscar e informarnos sobre las diferentes organizaciones que estén elaborando proyectos semejantes en la actualidad, pudiendo de este modo ajustar detalles tanto técnicos como económicos a nuestro caso. Gracias a la información de los diversos trabajos que se han realizado o se están desarrollando en una misma línea de actuación, se puede contar con fuentes fidedignas en caso de encontrarnos con cuestiones que en un primer momento no fueron capaces de solventarse.

Por otro lado es importante destacar la constante disponibilidad de la tutora de Proyecto de inicio a fin, pues es una gran especialista en su profesión dentro del departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos y ha aportado su amplio conocimiento para empujar la elaboración de este trabajo.

Quiero hacer una mención a la redacción del documento para acabar, pues se ha intentado en todo momento realizar una escritura sencilla y ordenada, que permita ser leída por el mayor número de público posible y despierte el interés sobre éste tipo de tecnología.

## 1.3 Recursos empleados

Para la realización de éste trabajo fueron necesarias varias herramientas informáticas, ya que el grueso del proyecto consiste en el modelado y la simulación numérica de un secador de algas, evaluando las gráficas y comportamientos de los productos obtenidos y los sistemas y equipos que intervienen a lo largo del proceso.

Los recursos empleados fueron:

- Libros de texto, documentos, artículos de revistas científicas, artículos especializados de internet, tutorías, conocimientos teóricos aprendidos en la universidad, etc.
- MATLAB®: software informático que permite la simulación numérica y creación de gráficas.
- Microsoft Office (Word y Excel): redacción del documento y soporte para estudio de gráficas y estudio económico.
- AUTOCAD: software informático de diseño y dibujo utilizado en éste proyecto en la creación de esquemas y diagramas.

## 1.4 Organización del documento

Se ha decidido estructurar el documento en las siguientes cinco partes: memoria, modelado y simulación del caso práctico, conclusiones, bibliografía y anexos. A continuación se detalla el contenido de cada una de las secciones en las que se ha dividido la redacción del proyecto.

- **Parte I - MEMORIA:** Se compone de 2 capítulos que representan la carga conceptual más teórica del proceso de secado de las algas. El Capítulo 1, en el que nos encontramos, contiene los objetivos bajo los que se sustenta el documento, la metodología y recursos empleados para realizar el proyecto y se exponen algunos conceptos previos que dan soporte al lector no familiarizado con la materia estudiada. En el Capítulo 2, se atienden todos los aspectos que forman el Marco Teórico. Está subdividido en 4 subcapítulos: en el primero se tratan todos los conceptos que rodean a las microalgas, qué son, porqué se usan, qué características y ventajas tienen, etc. Dentro del subcapítulo 2 se explica todo lo relacionado al proceso de secado: qué es y cómo funciona, qué sistemas de secado existen y los tipos principales de secadores que existen, entre otros conceptos. En el subcapítulo 3 abordamos teoría relacionada con los secadores y colectores solares de aire, estructura y tipos. Por último el subcapítulo 4 nos presenta el concepto de modelado y simulación numérica de procesos, junto con la herramienta informática usada MATLAB®.
- **Parte II – CASO PRÁCTICO - MODELADO Y SIMULACIÓN NUMÉRICA:** Está formada por tres epígrafes, en el Capítulo 3 se recoge todo el proceso de modelado y simulación numérica, desde la descripción del caso práctico, pasando por la resolución del modelo matemático hasta llegar al estudio de la cinética de secado, donde nos ayudaremos de la herramienta informática MATLAB® para el ajuste de curvas. En el Capítulo 4 se explica paso por paso cómo se han ido obteniendo los cálculos numéricos para el instante inicial, de tal forma que si aplicamos ése mismo procedimiento para el resto de instantes podremos simular el problema a lo largo del tiempo. En el último capítulo de ésta parte II se presentan distintos casos y las gráficas de las variables obtenidas, todos ellos con comentarios al respecto. En los diferentes casos se modifican distintas variables que darán lugar a distintas situaciones y por tanto, a distintos comportamientos en las variables a la salida del proceso de secado. Al final en el capítulo 5 se realiza un estudio energético y económico basado en uno de los casos anteriormente planteados, donde se examinan los costes productivos, inversiones y posteriores rentabilidades que se obtienen de un proceso de secado de algas.
- **Parte III - CONCLUSIONES:** es un capítulo en el que se recogen conclusiones que pueden ser tomadas como referencia en posteriores proyectos que extrapolen los datos obtenidos en esas fases, pudiendo potenciar la investigación económico-operativa de otras. Incluye diferentes valoraciones acerca de los resultados obtenidos, del proyecto en general, utilidades de futuro y una visión global.



- **Parte IV - BIBLIOGRAFÍA:** Comprende todo aquel documento, artículo de investigación o libro, que ha sido empleado en la realización del Proyecto Fin de Carrera, y que ha servido de apoyo conceptual al autor del mismo.
- **Parte V - ANEXOS:** Incluye el código del proyecto programado en MATLAB®, los catálogos y especificaciones técnicas de los aparatos más relevantes dentro del estudio energético y económico de la instalación del secador de algas.

## 1.5 Conceptos previos necesarios

Este documento está dirigido a cualquier tipo de lector, familiarizado con la materia o no, con un único requisito delimitado por el interés personal de adentrarse en el uso de las microalgas a nivel energético y la tecnología de secado solar de ésta materia prima.

- Los conceptos aquí desarrollados no suponen una barrera conceptual elevada pero sí pueden ser densos a la hora de conocerlos por primera vez. Muchos de ellos han sido definidos con cautela para poder acercar la lectura a todo tipo de personas. Así y todo, unos conocimientos de ingeniería térmica y de fluidos, de transferencia de calor y masa y manejo de la herramienta informática MATLAB®, básicos, serían recomendables para una comprensión y aprendizaje dinámico del proyecto, por parte del interesado.

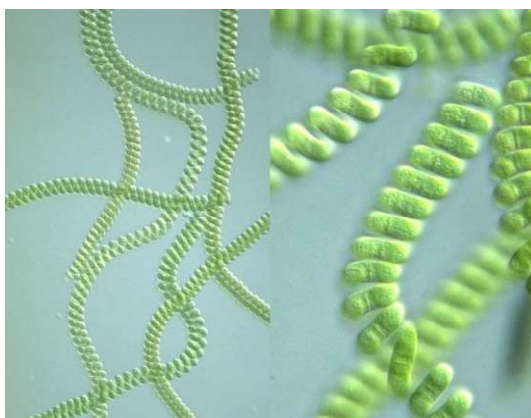
# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1 Microalgas, fundamento y concepto.

#### 2.1.1 ¿Qué son las microalgas? Tipos y Características

El presente trabajo se centrará en el secado solar de una materia prima que aunque se viene produciendo desde hace muchos años, es una de las grandes novedades actuales con mayor proyección en la industria en los próximos años, las microalgas. Son plantas microscópicas, generalmente muy pequeñas para ser detectadas a simple vista (de tamaño inferior a 200  $\mu\text{m}$ ), que crecen en pantanos, lagos, océanos, ríos o cualquier sitio donde haya humedad y luz suficiente. Hasta el momento se han identificado decenas de miles de especies de éstos microorganismos fotosintéticos en todo el mundo, pertenecientes a numerosas familias, clases, órdenes y géneros. Incluso para una misma especie, hay una enorme diversidad de cepas según las condiciones ambientales como la intensidad de la luz, el pH del agua, la temperatura o los nutrientes [1].



*Figura 2. Fotografía de Spirulina sp.. Microalga usada en tratamientos de alergias, anemias, enfermedades cardiovasculares y virales. [2]*

A pesar de que las microalgas realizan la fotosíntesis, muchas pueden usar sustratos orgánicos (como la glucosa, ácido acético, fructosa, etc.) en ambientes en presencia de luz o hasta en la oscuridad y algunas incluso han evolucionado hasta microorganismos no-fotosintéticos y viven permanentemente en la oscuridad [1].

Para hacernos una idea, todas las plantas terrestres pertenecen a una única división, *clorofita*, las cuales derivaron de las microalgas marinas fundadoras de tal agrupación. Esto implica que existe mucha más similitud, fisiológica, en composición bioquímica y pigmentaria, entre una microalga *clorofita* y cualquier planta terrestre, que entre esa misma microalga y cualquier microalga que flota a su lado y es aparentemente idéntica, pero perteneciente a otra división. Por tanto hay que ser correcto al hablar de microalgas, pues debemos ser conscientes de la enorme diversidad del término.

Algunos autores sostienen que existen unas 50.000 especies de microalgas, mientras que otros hablan de 100.000 tipologías. Como referencia indicar que aproximadamente el 80% de la producción industrial actual de microalgas, está basada en el cultivo de únicamente 3-5 cepas.

## Tipos y características

La clasificación de las cepas algales depende de parámetros tales como el ciclo de vida, la morfología, la pigmentación o la estructura celular:

- *Bacillariophyceae-Diatomea*, es una especie de microalga unicelular planctónica de 2  $\mu\text{m}$  a 1 mm de tamaño. Está presente en la gran mayoría de medios acuáticos, suponiendo un elemento relevante en el total del fitoplancton. Sus paredes celulares almacenan sílice polimerizada, con diversas presencias de carbono C, ya sea en aceites naturales o polímeros de carbohidratos.
- *Chlorophyceae* es una de las clases de algas verdes, destacadas del resto porque tienen una morfología ultraestructural. Se ha contabilizado un número medio de 2.000 especies diferentes de ésta familia. Tienen mayor presencia en aguas de tipo continental, lagos o ríos.  
Se caracterizan por contener reservas de almidón, y producen volumen oleaginoso bastante considerable en función de cómo se cultiven. Dentro de las algas verdes, son reseñables: *Dunaliella*, *Haematococcus* y *Chlorella*.

**En el proyecto** se tomó como referencia para la simulación numérica una **mezcla de 3 especies de algas verdes**: *Chlorella minutissima*, *Chlamydomonas globosa*, y *Scenedesmus bijuga*.

- *Chrysophyceae* (conocidas como algas doradas o algas verde-amarillas) es una categoría de microalgas que se encuentra mayoritariamente en aguas dulces. Habitan en la mayoría de los lagos y lagunas. Han sido contabilizadas alrededor de 1.000 especies. Se caracterizan por su contenido en aceites naturales y carbohidratos.
- Las cianobacterias, que atienden también al nombre de *Cyanophyceae* o algas verdeazuladas, son una clase de bacterias procariotas.  
En la actualidad se conocen más de 7.500 variantes. Al igual que algunas otras microalgas, las cianobacterias poseen la capacidad de captar el nitrógeno  $N_2$  del aire y sintetizarlo en amoníaco,  $NH_4^+$ , un estado del  $N_2$  que todo elemento celular puede aprovechar. Una de sus cepas más conocidas es *Spirulina*, destacada dentro de este grupo por su uso biotecnológico.

Las distintas características de cada una junto con las ventajas de las actuales técnicas de ingeniería genética, demuestra el amplio abanico de posibilidades que estos microorganismos presentan. En la Tabla 1 se presenta un resumen de algunos de los principales productos obtenidos mediante la utilización de estos microorganismos y su valor de mercado dando una idea de la importancia actual de estos procesos biotecnológicos en el mercado mundial.

Producto	Principal Uso	Valor (dólar/Kg)	Mercado Mundial (Mill. \$)
Phycobiliproteins	Investigación	10000	1-10
	Colorante	100	
$\beta$ -Caroteno	Provitamina A	500	1-10
	Colorante	300	
Xantofilas	Alimentación	200-500	10-100
Vitamina C	Vitamina	10	10-100
Vitamina E	Vitamina	50	10-100
Polisacáridos	Viscosificante	5-10	10-1000
Aminoácidos			
Prolina		5-50	1-10
Arginina		50-100	1-10
Ácido Aspártico	Adhesivo	2-5	100-1000
Proteínas	Alimentación	10-20	100-2000

*Tabla 1. Productos obtenidos a partir de microalgas [3].*

## 2.1.2 Razones para el uso de las microalgas.

Cada vez con más frecuencia escuchamos noticias sobre el uso de las algas en campos alejados de la industria de la alimentación, tales como la industria cosmética, la producción de biomasa, desarrollo de biocombustibles, etc. pero también han aparecido otros productos alternativos a las algas: hay microorganismos tales como las levaduras y bacterias que tienen la capacidad de sintetizar triglicéridos intracelulares hasta en un 80 % de su peso seco empleando distintas fuentes de carbono C y subproductos y/o residuos industriales o agrícolas. La desventaja a la hora de usar éste tipo de microorganismos es el coste productivo, pues necesitan un consumo elevado de oxígeno  $O_2$ .

Por el otro lado, las microalgas plantean una alternativa más sólida que cualquier otra clase de organismo para la producción de triacilglicéridos (también llamados grasas ó grasas neutras) y su procesamiento para uso energético (como biocombustible), puesto que algunas tipologías oleaginosas, siendo microorganismos fotosintéticos, sólo requieren energía solar, agua  $H_2O$ , dióxido de carbono  $CO_2$  y sales para generar muy altas eficiencias de biomasa rica en lípidos (grasas).

Las emisiones de  $CO_2$  producidas principalmente por los países industrializados y el aumento del efecto invernadero es uno de los temas más presentes y de mayor preocupación en la sociedad actual. De las emisiones de efecto invernadero, el  $CO_2$  ocupa alrededor del 68%, y son las responsables del cambio climático global [4]. La combustión de combustibles fósiles genera alrededor de un 66% de la electricidad mundial y produce aproximadamente un 33% de las emisiones globales de  $CO_2$ .

En 1997, más de 170 países firmaron el Protocolo de Kioto en Japón, iniciativa de las Naciones Unidas, donde se comprometieron a reducir en un 5,2% las emisiones globales de los gases de efecto invernadero en comparación con las emisiones de 1990. Se están realizando grandes esfuerzos desde entonces en el desarrollo de métodos para reducir el nivel de CO<sub>2</sub>. Se pueden citar tres estrategias principales distintas: la primera está basada en reacciones químicas, como el lavado con soluciones alcalinas [5]; la segunda se basa en la inyección directa y almacenamiento del CO<sub>2</sub> bajo tierra [6] o bajo el océano [7]; y la tercera y más interesante para este proyecto, se basa en la eliminación biológica o bioeliminación, mediante organismos fotosintéticos (microalgas). A diferencia de la creencia popular, la reducción de CO<sub>2</sub> debido a plantas terrestres contribuye solo en un 3-6%, mientras que las microalgas y cianobacterias que crecen mucho más rápido tienen un rendimiento de retención de CO<sub>2</sub> 10-50 veces mejor [8].

Por ejemplo en la década de los 90, en Japón se aprobó un programa para capturar CO<sub>2</sub> y gases de efecto invernadero con microalgas, la inversión fue superior a \$250 millones de dólares. La aportación de las microalgas a la reducción de la concentración de CO<sub>2</sub>, es uno de los aspectos que hace que tengan un gran apoyo popular y hacen de éstas uno de los temas de investigación con mayor crecimiento en la actualidad. Las microalgas han sido históricamente utilizadas como fertilizante, y como fuente de alimentación para humanos y animales [9]. También son utilizadas para el tratamiento secundario de aguas residuales, aunque la aplicación industrial de mayor interés por el valor de los productos obtenidos, es la de obtención de biocombustibles, componentes químicos o farmacéuticos a partir de su biomasa. La investigación y el desarrollo de los cultivos de microalgas han ido variando en los últimos años, desde temas como los ya explicados a la exploración espacial y a la producción de nuevos biocombustibles [1].

Desde un punto de vista de su composición química, los tres componentes mayoritarios de las microalgas son proteínas, carbohidratos y aceites. Durante la Segunda Guerra Mundial se observó que muchas especies de algas verdes cuando crecían en un ambiente con limitación de nitrógeno, acumulaban aceite en sus células, llegando a alcanzar concentraciones de aproximadamente un 70% del peso seco [10]. En la Tabla 2, se muestran algunos ejemplos de cultivos con elevadas concentraciones de lípidos. Se probó que la producción de microalgas con altas concentraciones de aceite era posible, pero lenta. Desde entonces se han hecho numerosos estudios pero es aún un problema sin resolver y una de las áreas de investigación de mayor interés. La razón de este gran interés por obtener altas concentraciones de aceite se debe a que éste puede ser utilizado para la producción de biodiesel. El biodiesel se produce a partir de aceites vegetales y/o grasas animales y metanol o etanol. El uso de materias primas de consumo humano para producir biodiesel (como aceite de girasol, de soja, de maíz o de colza) y el aumento de precios que esto ha provocado [11], hizo que la utilización de microalgas para la producción de biodiesel adquiriera gran importancia.

Microorganismo	Lípidos (% peso seco)
<i>Botryococcus braunii</i>	25-75
<i>Chlorella sp.</i>	28-32
<i>Cryptothecodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca sp.</i>	16-37
<i>Dunaliella primoleta</i>	23
<i>Isochrysis sp.</i>	25-33
<i>Monallanthus salina</i>	>20
<i>Nannochloris sp.</i>	20-35
<i>Nannochloropsis sp.</i>	31-68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35-54
<i>Nitzschia sp.</i>	45-47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20-30
<i>Schizochytrium sp.</i>	50-77
<i>Tetraselmis suecica</i>	15-23
<i>B. braunii</i>	25-75

Tabla 2. Contenido de lípidos en distintas microalgas [12].

Tanto es así que las microalgas son los organismos fotosintéticos de mayor rendimiento, absorben mayor cantidad de  $CO_2$  y liberan más  $O_2$  que cualquier planta, su crecimiento es extremadamente rápido y consiguen retener grandes cantidades de diversos productos.

Existen microalgas capacitadas para doblar su biomasa en el intervalo temporal de un día y el tiempo de duplicación de biomasa a lo largo de la fase exponencial puede ser tan reducido como 3,5 horas. Las ventajas obtenidas con el empleo de microalgas para su uso energético son:

1. Las microalgas poseen un rendimiento en aceite mucho mayor que cualquier cultivo convencional. Se cifra de 10 a 20 veces mayor que el derivado del aceite de palma y de 200 a 400 veces mayor que el derivado del aceite de soja.
2. Éste es el único producto bioenergético que presenta una verdadera **huella ecológica reducida**, dado que necesita una superficie de cultivo de 1-2 órdenes de magnitud menores en comparación a los cultivos habituales.
3. A modo de ejemplo, para obtener biodiesel de microalgas cultivadas en lagunas abiertas, sólo se requieren 200.000 ha para producir 1 cuatrillón de  $BTU^1$ . En contraste, se requieren aproximadamente 40 millones de ha si se utiliza etanol derivado de maíz o 20 millones de ha si se utiliza biodiesel derivado de frijol de soja.
4. Las microalgas oleaginosas pueden ser cultivadas en agua de mar o en agua salobre, disminuyendo así la presión sobre el agua dulce requerida para la producción de alimento. Algunas otras especies de microalgas aisladas de agua dulce, pueden crecer en aguas residuales, también eliminando así la competencia por el uso de agua para uso agrícola.

5. Las microalgas son excelentes captadoras de  $CO_2$ . Por cada 100 ton de microalgas producidas, se consumen 183 ton de  $CO_2$ , lo que las convierte en un factor en la reducción de  $CO_2$  en la atmósfera.
6. Con relación a la emisión de gases de efecto invernadero, es de los pocos materiales bionergéticos con un valor negativo, es decir, no se produce  $CO_2$  durante el ciclo de vida de producción y el valor de este parámetro para microalgas es el más negativo respecto a los otros bioenergéticos con valores negativos, como el etanol a partir de pastos o de residuos celulósicos.

<sup>1</sup>*British Thermal Unit.*-  $1 \text{ BTU} = 1\,055.056 \text{ J}$

## Razones del secado de las microalgas

Hay varias razones por las que es necesario y rentable secar las microalgas una vez crecen hasta su tamaño deseado y se obtiene un lecho húmedo de alga y agua, algunas de las razones son:

-El secado del alga es necesario ya que la demanda actual no es tan elevada como para dar salida a toda la materia húmeda que se produce en los campos de cultivo, por lo que es necesario secarla de tal forma que se pueda almacenar para su posterior uso sin que se produzca el deterioro de la misma.

-Las propiedades en términos de uso energético como combustible para quemar que posee una biomasa compuesta de algas con altos contenidos en agua son mucho peores que las propiedades de una biomasa algal seca y con elevada concentración en lípidos, que arderá mucho mejor en presencia de una llama y dará mucha más energía en un intervalo de tiempo menor.

### 2.1.3 Las microalgas en la actualidad

Como se ha explicado anteriormente, la gran variedad de cepas existentes y la posibilidad de modificar sus características controlando las condiciones del proceso o bien mediante técnicas de ingeniería genética, hacen que la variedad de productos que se pueden obtener a de microalgas sea enorme. Sus usos varían desde la agricultura, nutrición humana, alimentación animal o la industria farmacéutica, hasta la obtención de compuestos orgánicos complejos como el biodiésel.

A continuación, se describen algunas de las principales aplicaciones y productos que se pueden obtener actualmente mediante éstos microorganismos.

#### A. Biorremediación

El constante aumento de la población va ligado a un aumento en la producción y a su vez a un aumento en la contaminación de los ecosistemas. Las emisiones de  $CO_2$  de los países industrializados y el continuo aumento de su concentración en el medioambiente son uno de los temas de mayor preocupación en la sociedad actual. El  $CO_2$  ocupa alrededor del 68% de las emisiones de gases de efecto invernadero, las responsables del cambio climático global [4]. Las microalgas y

cianobacterias marinas juegan un papel importantísimo en el control del cambio climático y en la descontaminación del medioambiente. Son utilizadas en la actualidad en muchos procesos de biodescontaminación, a destacar el tratamiento de aguas residuales, la reducción del CO<sub>2</sub> y el saneamiento de ecosistemas marinos contaminados. Con el uso de las microalgas, se utiliza el CO<sub>2</sub> emitido como fuente de carbono y es transformado en sustancias como medicamentos, cosméticos, alimentos o biocombustibles que alcanzan elevados precios en el mercado. Se puede combinar esta tecnología con el tratamiento de aguas residuales que se tratarán más adelante para obtener productos de elevado valor añadido utilizando materias primas gratuitas [13] y favoreciendo la reducción de la contaminación.

### *B. Industria Alimentaria*

Normalmente el principal objetivo para producir alimento vivo es establecer una cadena alimenticia controlada, es decir, el cultivo de microalgas para alimentar organismos zooplanctónicos que a su vez servirán de alimento a peces u otros animales [14]. Desde el punto de vista nutricional, las microalgas son fuente de macronutrientes, micronutrientes y de ácidos grasos esenciales. El gran contenido de proteínas y polisacáridos de varias especies de microalgas es una de las principales características de interés alimenticio y las convierte en una nueva fuente de proteínas. La presencia de éstos ingredientes además de otros da a las microalgas un valor añadido difícil de conseguir.

### *C. Biocombustibles*

El aumento constante de la demanda mundial de combustibles y la concienciación de la población y sus representantes con el cuidado del medioambiente (especialmente con los gases de efecto invernadero) han motivado a los científicos y centros técnicos de todo el mundo, especialmente en Estados Unidos (ver figura 3) a buscar alternativas y soluciones a estos problemas. Los biocarburantes o biocombustibles son combustibles que se generan a partir de procesos biológicos, y a diferencia de los combustibles convencionales, estos son de origen biológico no fosilizado, como las microalgas. Al tratarse de recursos inagotables, son excelentes para reemplazar los combustibles que se producen con petróleo, cuyos recursos escasean y que emite gran contaminación con su combustión a la atmósfera. Este tipo de biocombustibles se pueden usar en los motores de combustión interna actuales. La principal ventaja de utilizar microalgas para la producción de biocombustibles, es que éstas pueden ser cultivadas durante todo el año y en zonas donde no es posible cultivar plantas terrestres. También está su rápido crecimiento y la gran cantidad de especies que dependiendo de las condiciones en que se cultive pueden llegar a alcanzar concentraciones de aceite de un 20-50% en peso seco.



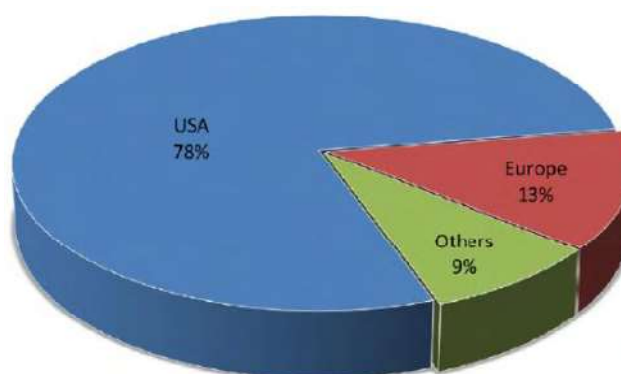


Figura 3. Localización de las compañías alrededor del mundo produciendo biocombustibles a partir de microalgas [15].

### Bioetanol

Es el producto de una fermentación alcohólica de materiales orgánicos, como biomasa o cereales, mediante la acción de microorganismos. El continuo aumento de los precios del petróleo está provocando una búsqueda exhaustiva de nuevas energías y la utilización de bioetanol es una de ellas. La producción está creciendo rápidamente en los últimos años, tal como se observa en la Tabla 3.

País	2000	2002	2004	2006	2009
EE.UU	106	140	221	319	713
Brasil	184	217	252	306	466
China	0	5	7,2	24,1	37
Francia	2	2	1,7	5	22
Canadá	3,7	4	4	4,4	18,7
Alemania	0	0	0,4	7,4	14
Tailandia	0	0	0,1	2,2	7
India	2,9	3,2	3,5	4,1	5,8

Tabla 3. Mayores productores mundiales de bioetanol (Millones de barriles equivalentes de petróleo por día) [16].

Actualmente, el bioetanol se produce a partir de la fermentación del azúcar que a su vez se puede obtener mediante hidrólisis del almidón. La ventaja de las microalgas es su gran capacidad de generación de biomasa, algo que no sucede con las plantas terrestres que pueden tardar muchos meses e incluso años en crecer. Se han detectado especies con concentraciones superiores al 50% de almidón, y mediante nuevas técnicas la celulosa y hemicelulosa se transforman en azúcares aumentando aún más el porcentaje de la célula fermentable [17].

### Biodiésel

El biodiésel consiste en alcoholes de cadena corta, normalmente etanol y metanol, con ácidos grasos de cadena larga obtenidos a partir de biomasa renovable y que

es técnicamente capaz de sustituir al diesel derivado de petróleo como combustible [18]. la principal ventaja del biodiesel es que es una fuente de energía renovable y biodegradable (hasta cuatro veces más rápido) y produce menos emisiones contaminantes al medioambiente (CO, hidrocarburos, aromáticos policíclicos, óxidos de azufre,...) durante su combustión debido a su estado oxigenado [18].

Es evidente por lo tanto que en un futuro inmediato, la utilización de plantas oleaginosas no alcanzará a reemplazar a los combustibles fósiles. Si se lograra implantar el uso de microalgas para producir biodiesel, se calcula que solo con cultivar entre un 1 y un 3% del total del área de cultivo de los Estados Unidos sería suficiente para satisfacer el 50% del combustible necesitado anualmente [19].

La ventaja competitiva más importante del biodiesel de microalgas consiste, tal como se observa en la Tabla 2, en los rendimientos lipídicos por unidad de área, considerablemente superiores a los obtenidos por plantas oleaginosas [20]. El rendimiento anual de biodiesel obtenido a partir de microalgas duplica los rendimientos obtenidos a partir de plantas terrestres [18].

## 2.1.4 Elección de la especie para su posterior uso en el caso práctico

La elección del tipo de microalga es el primer paso para el desarrollo de un proceso de secado, ya que las características y propiedades finales obtenidas del producto seco dependen principalmente de ello.

La especie debe tener las características adecuadas para las condiciones de secado tan particulares en las que se quiere obtener los productos específicos. Entre las principales características deseables para procesos de secado están: crecimiento rápido, alto contenido de productos de elevado valor añadido (lípidos), desarrollo en ambientes extremos, células grandes en colonias o filamentos, gran tolerancia a condiciones ambientales, permisividad hacia niveles altos de temperatura, a contaminantes y al efecto físico de la agitación o turbulencia.

Desde los años 80 se vienen financiando programas en diferentes países para desarrollar combustibles renovables como el biodiésel a partir de algas con alto contenido de aceite. Tras escoger más de 3.000 especies con especial interés en cepas productoras de lípidos, se vió que el rendimiento por unidad de superficie de aceite de microalga era aproximadamente 200 veces mayor que el máximo rendimiento de cualquier cultivo oleaginoso. Posteriormente, se han descrito numerosas listas de cepas de origen marino o de agua dulce que muestran un alto contenido de lípidos. Existen diversos estudios con especies del género *Chlorella* (como es el caso de éste proyecto), con especies de *Dunaliella*, de *Nannochloris* y con *Botryococcus Braunii* por mencionar algunos de ellos. *Nannochloris* y *Dunaliella* son especies pseudomarinas con buenas ventajas para ser cultivadas en zonas costeras.

Últimamente, varios grupos de investigadores han comenzado a trabajar en la posibilidad de producir cepas genéticamente mejoradas. Aunque la aplicación de la ingeniería genética para mejorar la producción de lípidos se encuentra en etapas muy tempranas, ya se han desarrollado herramientas de manipulación genética en ciertos modelos, para variar el metabolismo central del carbono C en estos organismos. Sin embargo, es posible que los resultados de esta estrategia sean de mediano y largo plazo, considerando que se ha enfatizado en generar mucho conocimiento para posteriormente lograr manipular el metabolismo de lípidos.

## 2.2 El Proceso de Secado

### 2.2.1 Introducción. El proceso de secado, etapas y factores

El proceso de secado es uno de los métodos más antiguos que existen para deshidratar productos y conservarlos, y su principio básico consiste en retirar el agua existente en los tejidos y células de dichos productos hasta un valor adecuado que evite la putrefacción y pérdida de ellos, en éste caso de las microalgas. El secado en éste proyecto se encargará de reducir la humedad del lecho de microalgas para facilitar su almacenamiento y posterior uso, ya sea comercialización, investigaciones, usos energéticos, etc.

El secado se puede llevar a cabo mediante aire natural ó aire caliente, donde en éste caso el aire caliente empleado para secar las microalgas procede de un colector solar integrado en la instalación. La temperatura que adquiere el alga tras el proceso de secado es determinante para ver la calidad del aire a la salida del secadero en comparación a cómo entra antes de la cámara de secado.

Físicamente hablando, el secado es un proceso donde hay un intercambio de energía y masa entre el fluido empleado y el sólido a secar. Para llevarlo a cabo se ha de disponer de una fuente de calor que aporte un gas caliente y seco, el cual producirá que la humedad contenida en el sólido se transfiera por evaporación hacia la fase gaseosa, en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa. Cuando estas dos presiones se igualan, se dice que el sólido y el gas están en equilibrio y el proceso de secado cesa (*Kasatkin. 1985*).

Los dos procesos, de intercambio de calor y masa, ocurren simultáneamente cuando un sólido húmedo (el lecho de microalgas en éste caso) es sometido al secado térmico:

- Tendrá lugar una Transferencia de Energía en forma de calor, de los alrededores para evaporar la humedad de la superficie del producto. Dicha transferencia puede ocurrir por el efecto de mecanismos como la convección, conducción y/o radiación, y en algunos casos se puede presentar una combinación de estos efectos.

-Habrá una Transferencia de Materia (agua) interna hacia la superficie del sólido. Éste proceso se considera como la transición física del agua del estado líquido al de vapor, en donde la transferencia de masa tiene lugar cuando existe un gradiente de concentración o de presión.

## Los balances de Materia y Energía (*BMyE*) [45]

Son una de las herramientas más importantes en la ingeniería de procesos y se usan para contabilizar los flujos de materia y energía entre un proceso industrial y los alrededores o entre las distintas operaciones que lo integran. Nos permitirán conocer los caudales másicos de las corrientes materiales del proceso, así como las necesidades energéticas del mismo, entre otras cosas.

Gracias a los *BMyE* se obtiene la información necesaria para proceder al dimensionamiento de los equipos y la estimación de las necesidades de servicios auxiliares (vapor, aire, refrigeración).

Balance de Materia (BM): Se basa en la ley de conservación de la materia. En los procesos industriales donde no existe transformación de materia en energía o viceversa, la forma general del balance de materia TOTAL a un sistema, será:

$$\begin{bmatrix} \text{ENTRADA} \\ \text{DE} \\ \text{MATERIA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{SALIDA} \\ \text{DE} \\ \text{MATERIA} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{ACUMULACIÓN} \\ \text{DE} \\ \text{MATERIA} \end{bmatrix}$$

La forma del balance a cada uno de los componentes será la misma, excepto cuando existe reacción química (que no es nuestro caso), ya que en ese caso habrá que considerar la aparición o desaparición de los componentes individuales por efecto de la reacción (sin embargo la masa total del sistema nunca variará).

Cuando el proceso es estacionario, el término de acumulación será 0, pero **en éste caso el proceso no es estacionario** (pues varían las condiciones con el tiempo), de hecho introducimos término de acumulación pues la hay, por eso se hará una discretización en el tiempo.

Balance de Energía (BE): Son algo más complejos que los de materia, pues la energía puede transformarse de unas formas a otras (mecánica, térmica, química, etc.), lo que obliga a considerar este aspecto en las ecuaciones. En nuestro caso el *BE* es imprescindible pues hay un intercambio de energía entre el aire- alga determinante, ya que tenemos que calentar o enfriar fluidos.

## Comportamiento de la temperatura del aire y del alga

En el instante de tiempo  $t \leq 0$ : El escenario que tenemos consiste en una masa “encharcada” de algas con agua superficial abundante en todo el producto. Éste proceso se puede considerar **estacionario**, pues hasta que se consuma todo el agua superficial, la temperatura del producto  $T_p$  no varía. A ésta primera fase la podemos llamar “**constant rate period**”

En el instante de tiempo  $t=0$ : nos encontramos en una fase con ausencia de agua superficial (se ha consumido toda). La temperatura del producto (las algas)  $T_p$  va incrementándose poco a poco a medida que la masa de algas va perdiendo contenido en agua. A ésta segunda fase la llamamos “**falling rate period**”.

## El proceso de secado

En algunos casos los productos húmedos van a tolerar ser secados por gases calientes producto de procesos de combustión, mientras que otros materiales, como aquellos destinados a alimentación animal o aquellos en los que no se desea la presencia de contaminantes en su composición (como es el caso de las microalgas), son menos tolerantes y requieren ser secados por aire caliente.

La instalación necesaria para realizar un secado consiste en un sistema de alimentación, una cámara donde se realiza el proceso propiamente dicho y un sistema para enfriar y evacuar el producto. El proceso, como ya se ha indicado, tiene lugar dentro de una cámara cerrada donde se aporta el calor necesario y se controlan parámetros como la velocidad de secado, el rendimiento del mismo y la humedad del producto final.

## Factores que influyen en el secado

Los parámetros de secado no son independientes, sino que influyen en la tasa de secado como un conjunto y no aisladamente. El manejo correcto de dichos parámetros permite determinar el equipamiento apropiado para las condiciones específicas de secado [21].

### Condiciones externas

Las etapas iniciales del proceso de secado son aquellas en las que la humedad presente en la superficie del sólido será reducida en primer lugar. Es por ello que las condiciones externas tales como la temperatura del aire, humedad y flujo de éste, área superficial expuesta del sólido, presión, etc, tienen importancia en primer lugar.

Éstas condiciones son las principales responsables de la cantidad de energía necesaria para alcanzar la temperatura del aire de secado deseada. Cuanto menor sea la temperatura ambiente del aire de entrada al colector, mayor será la cantidad de energía necesaria para calentar ese aire.

Al evaporarse la humedad de la superficie pueden darse casos de ‘encogimiento’ si se da una excesiva evaporación en la superficie, pues tras eliminar la humedad inicial aparecen altos gradientes de humedad del interior del sólido hacia la superficie. Cuando se realiza un sobresecado y posterior encogimiento, surgen elevadas tensiones internas en el material que dan como resultado agrietamiento y deformación [22].

### Condiciones internas

La distribución de agua dentro del sólido a secar depende de la propia naturaleza física de éste (su estructura, composición...), de la temperatura y de su contenido

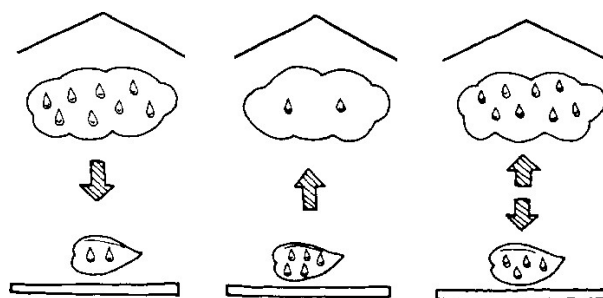
en humedad. Durante una operación de secado cualquiera de éstos parámetros puede determinar la velocidad de secado.

El secado depende principalmente de seis factores:

- **El flujo/velocidad del aire de secado a la entrada.** El aire calentado en un colector solar será el medio encargado de transportar la humedad que despiden las microalgas a secar. A mayor velocidad del aire aumenta la capacidad de arrastre de humedad.
- **Contenido en oxígeno  $O_2$ .** Se entiende por contenido de oxígeno la cantidad, en volumen, de oxígeno presente en el fluido de secado. Si se emplea aire, éste tiene un contenido en oxígeno de aproximadamente el 21% en volumen y si se utilizan gases procedentes de un motor de cogeneración, por ejemplo, el porcentaje de oxígeno suele estar alrededor del 14%, al tener una importante proporción de  $CO_2$ . Este parámetro es de control porque si se aplican grandes flujos de corriente gaseosa se producen elevadas velocidades de transporte, muchos choques en el interior del secadero (alta fricción) y, obviamente, por la gran cantidad de oxígeno estos sistemas son propensos a tener incendios y/o explosiones.
- **La humedad relativa.** Es la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en el aire y la máxima cantidad que puede contener a la misma temperatura. Si se aumenta la temperatura, aumenta la capacidad del aire de contener vapor de agua, lo que quiere decir que puede absorber mayor cantidad de vapor de agua de la sustancia a secar. Igualmente si se extrae vapor de agua del gas, se baja su humedad relativa y aumenta la capacidad de extraer vapor del producto. A una humedad relativa dada, hay un valor de equilibrio de la humedad del material, de ese valor ya no pierde más humedad. Por eso hay que ir variando las condiciones de funcionamiento a medida que la sustancia se va secando.
- **La temperatura.** Como ya se ha dicho la temperatura afecta al valor de la humedad relativa del aire y por lo tanto la capacidad del mismo de extraer humedad del sólido a secar. También aumenta la velocidad de las moléculas de agua y favorece el proceso de vaporización.[45]
- **Tiempo de residencia.** El tiempo de residencia de los sólidos en el interior del secadero es una consecuencia del sistema de secado. Técnicamente es el preciso para eliminar toda el agua. En casi todos los secaderos este tiempo oscila alrededor de los 30 minutos, pero depende de la capa de material con la que se trabaje.
- **Consumo energético.** El consumo térmico de un secador depende esencialmente del calor latente de vaporización del agua, pero también depende de la eficacia de la transferencia de calor, del caudal de aire en circulación o las pérdidas de calor. El consumo eléctrico va a depender del principio de funcionamiento elegido.

## Higroscopicidad y humedad de equilibrio

La higroscopicidad es la propiedad que tienen los materiales para absorber o dar humedad a la atmósfera que circunda hasta que entren en equilibrio con ella. Cuando el producto a secar se encuentra durante un tiempo suficientemente prolongado en un ambiente donde el aire está a una determinada humedad relativa y temperatura, adquiere un contenido de humedad en equilibrio con dicho ambiente, es decir, no absorbe ni pierde más agua, mientras el ambiente, por supuesto, no varíe su humedad y temperatura [23].



*Figura 4. Humedad de equilibrio higroscópico (Fuente:www.fao.org Ingeniería Poscosecha I)*

La humedad de equilibrio será la humedad específica que un material higroscópico adquiere cuando se mantiene en contacto con el aire a una temperatura y humedad constantes hasta llegar al equilibrio.

## 2.2.2 Sistemas de secado

Aunque existen muchos criterios para establecer una clasificación de los sistemas de secado térmico, se resumen a continuación los sistemas de secado clasificados de acuerdo con los siguientes criterios [24]:

- Según el método de secado
- Según el medio de secado
- Según el sistema de transferencia de calor del medio calefactor
- Según la Temperatura de secado

### 2.2.2.1 Según el método de secado

Básicamente existen dos métodos para el secado, el secado artificial y el secado natural [25].

#### Secado artificial

Dado el aumento constante de la población y en consecuencia de sus necesidades, ha aumentado la demanda de productos agrícolas, biomasa, combustibles limpios, etc, siendo necesario secar los productos en plazos cada vez más cortos y sean cuales sean las condiciones climáticas. Por esta razón el secado artificial es la opción más elegida.

Mediante un ventilador se hace pasar el aire caliente hacia el producto a secar, situado en la cámara de secado. Los procesos de secado a altas temperaturas utilizan grandes flujos de aire con temperaturas que pueden superar los 100°C. La capacidad de retención de agua de dicho aire aumenta según sube su temperatura, con lo que se incrementa a su vez la capacidad de secar de dicho aire. Los procesos de secado a altas temperaturas son más rápidos a la hora de secar un producto que otros procesos de secado natural o solar.

### Secado natural

Consiste en dejar el producto a secar expuesto a las corrientes de aire y a la temperatura del medio ambiente, y puede realizarse en patios o terrenos abiertos. El origen de éste secado se remonta a países o regiones donde las condiciones climáticas son estables y más bien secas. La mayoría de los países europeos, sobre todo los ubicados hacia el norte del continente, se encuentran en una situación opuesta a las condiciones ideales, pues casi toda su producción se cosecha húmeda y debe ser secada.

Las ventajas de éste método son diversas a destacar: no tiene gasto en combustible para el calentamiento del aire y por tanto supone un ahorro económico, es una tecnología ‘limpia’, no emite gases contaminantes y no contamina el producto, se puede trabajar con cantidades considerables de producto dependiendo de la infraestructura, etc.

Por el otro lado, como desventajas principales tenemos que no se puede utilizar durante todo el año debido a los diferentes climas que sufren las regiones, la inversión inicial es costosa, el proceso de secado puede resultar lento en ocasiones, dado las condiciones climáticas, la humedad inicial del producto, rendimientos del colector solar y los parámetros de entrada entre otros.

## **2.2.2.2 Según el medio de secado**

El medio de secado puede ser vapor sobrecalentado, aire caliente o gases generados en procesos de combustión.

Los secaderos de gases y aire tienen emisiones de aire y riesgo de incendio, mientras que el secadero de vapor sobrecalentado no. Los secaderos de vapor sobrecalentados por el contrario generan un condensado que debe ser tratado.

También se podría utilizar un fluido térmico líquido, como es el aceite, en el caso de sistemas que la transferencia de calor sea indirecta.

## **2.2.2.3 Según el sistema de transferencia de calor**

### **- Secado directo o por convección**

Los secaderos directos transfieren el calor por contacto del producto con un gas calentado, normalmente aire caliente. El proceso de secado con aire consistirá en



eliminar el agua del sólido húmedo a secar, que en éste proyecto serán microalgas, a la que consideraremos el producto. El medio de secado, el aire, contacta directamente el material y transporta la humedad evaporada. Se denomina Transferencia de Calor por Convección ó Convección Térmica.

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural producida solo por las diferencias de densidades de la materia; o forzada, cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, por ejemplo el aire con un ventilador (como nuestro caso) o el agua con una bomba. Sólo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio.

Un modelo de transferencia de calor  $\dot{Q}$  por convección, se centra en el estudio del flujo global de calor entre el fluido y la pared llamado ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q} = h_c * A * (T_A - T)$$

donde  $h_c$  se llama coeficiente de convección, en  $W/(m^2 K)$ ,  $A$  es la superficie (en  $m^2$ ) que entrega calor con una temperatura  $T_A$  al fluido adyacente, que se encuentra a una temperatura  $T$ . El flujo de calor por convección es positivo ( $\dot{Q} > 0$ ) si el calor se transfiere desde la superficie de área  $A$  al fluido ( $T_A > T$ ) y negativo si el calor se transfiere desde el fluido hacia la superficie ( $T_A < T$ ).

El coeficiente de convección  $h_c$  también llamado transmitancia térmica[45]

Se determina con ayuda de correlaciones empíricas obtenidas a partir de los experimentos, aunque cada vez son más numerosos los programas de ordenador para la resolución numérica del problema concreto de que se trate.

Para calcular  $h_c$  hay que determinar teórica o experimentalmente  $\dot{Q}$  para la geometría y condiciones de contorno impuestas. Para el cálculo teórico se necesita previamente calcular el campo de temperaturas, y entonces resolver el problema conjunto, aplicando el balance másico, mecánico y energético y conociendo las propiedades de estado y de evolución del fluido de que se trate. Para simplificar el análisis teórico y reducir la cantidad de datos a determinar, se utilizan parámetros adimensionales. Así, en lugar de presentar funciones tal como  $h_c = h_c(k, C_p, \rho; \mu, V, g, \alpha, \gamma, L, D$  y otras distancias), se procede a agrupar en parámetros adimensionales tradicionales (llamados "números" porque no tienen unidades), a los cuales se les da nombre propio como se indica a continuación:

$$\left. \begin{array}{ccccccc} \frac{hD}{k} = f \left( \text{geometría}, \frac{VD}{\nu}, \frac{\nu}{\alpha}, \alpha g (T_w - T_\infty) \frac{D^3}{\nu^2}, \dots \right) \\ \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \\ Nu = f(\text{geometría}, Re, Pr, Gr, \dots) \end{array} \right\}$$

Donde:

- $Nu$  es el número de Nusselt (mide la relación entre el flujo de calor por convección y por conducción)
- $Re$  es el número de Reynolds (que mide la relación entre las fuerzas de inercia y las viscosas, y caracteriza el tipo de flujo: laminar o turbulento)
- $Pr$  es el número de Prandtl (que mide la relación entre las difusividades viscosa y térmica del fluido, y es  $\approx 10$  para líquidos,  $\approx 0,7$  para gases y  $\approx 10^{-2}$  para metales fundidos)
- $Gr$  el número de Grashof (que mide la relación entre las fuerzas de flotabilidad y las viscosas)
- etc

La convección siempre aumenta el flujo de calor y por eso el parámetro adimensional con que se evalúa es el número de Nusselt [45]:

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

(donde  $h$  y  $k$  son el coeficiente de convección y la conductividad térmica del fluido y  $L$  una longitud característica o diámetro hidráulico  $D$ ). El Nusselt es siempre mayor que la unidad, al ser una relación entre convección y conducción. Como hemos observado el número de Nusselt depende del número de Reynolds y del número de Prandtl, de la siguiente forma:

$$Nu = cte * Re^m Pr^t$$

Este valor del nº Nusselt lo usaremos para calcular el coeficiente de convección  $h_c$  en las ecuaciones de Balance. Por otro lado el nº Reynolds  $Re$  lo calcularemos para un valor concreto de flujo, viscosidad y temperatura.

La expresión genérica que acabamos de ver no nos sirve para aplicarla a un caso práctico, por lo que hay que encontrar una correlación adecuada para nuestro caso de flujo interno turbulento.

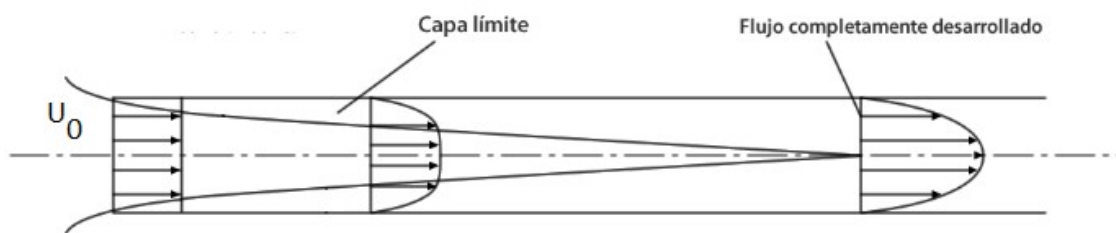
Dentro de las correlaciones empíricas adimensionales usadas en flujo interno y para procesos de secado, usaremos la siguiente correlación para obtener el número de Nusselt:

$$Nu = 0.11 * Re^{0.71} Pr^{1/3} [26]$$

## Flujo Interno y turbulento

Cuando se contempla la geometría del sistema global aparecen dos tipos diferentes de configuraciones, el flujo externo y flujo interno. En nuestro caso nos centraremos en el flujo interno, llamado así porque es un flujo confinado que no puede salir. Los flujos internos son aquellos que quedan completamente limitados por superficies sólidas, como por ejemplo el flujo interno en tuberías y conductos.

Si consideramos el secadero/cámara de secado como una tubería con flujo incompresible, el flujo es uniforme a la entrada del tubo o secador y su velocidad es igual a  $U_0$ . En las paredes la velocidad vale cero debido al rozamiento y se desarrolla una capa límite sobre las paredes del tubo [45].



*Figura5. Región de entrada en una tubería para flujo interno [27]*

Para nuestro caso no hay consideraciones de capa límite, para simplificar los resultados, por lo que consideraremos el flujo completamente desarrollado desde la entrada de la cámara de secado hasta la salida del secador.

La turbulencia o flujo turbulento es un estado del movimiento del fluido en el que la velocidad, la presión  $P$  y otras propiedades varían con el tiempo  $t$  y el espacio brusca e irregularmente.

Las principales características de los F. turbulentos son [28]:

- Altos números de Reynolds  $Re$ ,  $Re \gg 1$
- Son irregulares
- Efectos difusivos y disipativos
- Sensibles a los cambios en las C.I. y las C.C.
- Medio continuo y equilibrio termodinámico local.

### - Secadero indirecto o por conducción

Los secaderos indirectos transfieren calor al producto mediante el contacto con una superficie calentada por aire, vapor o un líquido térmico. Pueden utilizarse camisas (intercambiadores) para aportar el calor.

El aire de secado, después de evaporar el agua del producto, pasa por un condensador para separar las sustancias evaporadas y se vuelve a calentar para utilizarse de nuevo. Se consigue así un circuito cerrado. Las únicas emisiones a la atmósfera son la de los gases procedentes de los focos de emisión de calor que se emplean en el intercambiador. Es un proceso de mayor eficacia medioambiental indicado para productos con sustancias volátiles de alta toxicidad. En particular, los secaderos indirectos son más convenientes para materiales polvorientos y finos.

### - Secaderos por radiación

En ellos se aporta energía al material a través de ondas electromagnéticas: infrarrojos o microondas. No está muy extendido su uso a nivel industrial para

biomasa, pero sí para aplicaciones donde tiene gran importancia la calidad del producto.

Entre sus ventajas están que el secado es más rápido, se consigue un calentamiento uniforme, es más eficiente energéticamente y existe un mejor control del proceso.

### 2.2.2.4 Según la Temperatura de secado

Se habla de media y baja temperatura para estos secaderos porque el secado a alta temperatura no se considera un secado en sí ya que puede ocasionar la autocombustión del material.

#### a) Secadero a media temperatura

En este grupo se engloban la mayoría de las tecnologías de secado térmico convencional. El calor necesario para el secado se aporta quemando gas, gasóleo u otro combustible, de forma que, el material es sometido a temperaturas de 120°C a 150°C.

#### b) Secadero a baja temperatura

En este sistema el material es sometido a temperaturas límites de 70 °C en un túnel de secado continuo, donde el calor necesario se aporta con sistemas que trabajan a baja temperatura. Dentro de este grupo se encuentran los sistemas de transferencia de calor (bomba de calor) en circuito cerrado. Con el sistema de bomba de calor, se consigue un material con humedad final inferior al 15% y el residuo del proceso es agua condensada. Esta técnica se encuadra dentro de las técnicas de ahorro energético, dado que la mayor parte de energía del proceso se consigue recuperando el calor residual de la propia agua evaporada.

También se pueden utilizar sistemas de cogeneración y aprovechar el calor residual de los motores de combustión.

La elección de qué método de secado usar depende de varios factores, tales como, el tipo de producto (y su valor comercial), la disponibilidad de equipos para secar, coste económico del proceso, calidad final del producto desecado, etc.

A pesar de que el método de secado más utilizado hasta el momento es el secado convectivo utilizando aire caliente para ‘secar’ el producto y favorecer la deshidratación, hay una serie de problemas asociados a la utilización de aire caliente para el secado de la materia. Los inconvenientes a destacar son los siguientes:

- Las pérdidas de calidad de los productos, produciendo pérdidas en el color, textura, y ciertos cambios químicos que afectan el sabor y promueven importantes pérdidas de nutrientes (Mayor y Sereno, 2004).

- Las altas temperaturas requeridas para la deshidratación es la mayor causa de las pérdidas de calidad. La reducción de la temperatura del proceso tiene un gran potencial para lograr el mejoramiento de la calidad de los productos desecados (Beaudry y col., 2004).

-Cuando la temperatura en el secado por convección se reduce, los tiempos de operación deben aumentarse y los costos asociados se incrementan progresivamente haciendo que la reducción de la temperatura en este proceso sea inaceptable.

Con el fin de aumentar la calidad de los productos y a su vez disminuir el tiempo de operación han sido desarrollados pre-tratamientos y nuevos métodos de secado a bajas temperaturas, como la deshidratación osmótica y las microondas.

Actualmente existe una creciente demanda de algas deshidratadas de alta calidad y estables. Los equipos de secado y las condiciones de operación para estos productos deben ser seleccionados y diseñados en base a las características de la materia prima, requerimientos de calidad del producto final y del análisis económico. A pesar de estas consideraciones, la aplicación del modelado matemático y la simulación computacional en el diseño y optimización de secadores es aún escasa debido a la naturaleza compleja de los vegetales y la dificultad de valorar los cambios en la calidad de éstos durante el proceso de secado.

## 2.2.3 Tipos de secadores

Hay muchos tipos de secaderos usados en el secado de la biomasa y la selección del secadero apropiado depende de muchos factores a tener en cuenta incluyendo el tamaño y las características de la materia prima, coste de capital, requerimientos de operación y mantenimiento, emisiones ambientales, eficiencia energética, fuentes de calor de subproductos disponibles, espacio disponible, y riesgo de incendio potencial.

De acuerdo a la clasificación de la operación de secado encontramos los siguientes tipos de equipos (Treybal, 1965):

- Secaderos de calentamiento directo.

### a) Equipos discontinuos

Secaderos de bandejas con corriente de aire.

Secaderos de lecho fluidizado.

Secaderos con circulación a través del lecho sólido.

### b) Equipos continuos

Secaderos de túnel o banda.

Secaderos neumáticos o flash.

Secaderos ciclónicos.

Secaderos de lecho chorreado.

Secaderos de lecho vibratorio.

Secadero de lecho fluidizado.

Secaderos sprays.

Secaderos de tipo turbina.

Secaderos rotatorios.

- Secaderos de calentamiento indirecto:

a) Equipos discontinuos

Secaderos de bandejas a vacío.

Secaderos de bandejas a presión atmosférica.

Secaderos por congelación.

b) Equipos continuos

Secaderos de tambor.

Secaderos de paletas.

Secaderos con circulación a través del lecho.

Si se realiza la división en función del recipiente del secador encontramos:

- 1 de bandeja
- 2 de tambor rotatorio
- 3 de lecho fluidizado
- 4 neumático
- 5 de spray

A continuación se van a explicar alguno de ellos:

### 1. Secadero de bandejas

Ideal para industrias farmacéuticas, alimentarias y químicas.



*Figura 6. Secador de bandejas [29]*

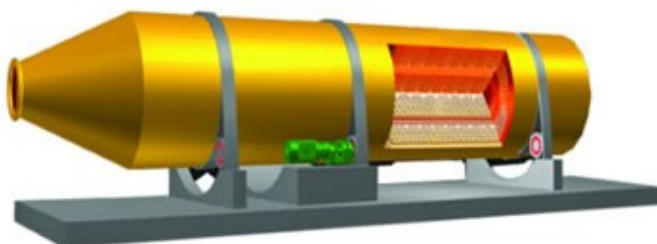
El secador de bandejas también llamado secador por lotes o secador tipo ‘batch’ será el empleado en éste proyecto. Consiste en una cámara tipo túnel de tamaño suficientemente grande para alojar los materiales a secar, en el cual se hace correr suficiente cantidad de aire caliente y seco, que será calentado (en el proyecto mediante un colector solar) de modo que pueda arrastrar suficiente agua para un secado eficiente.

Deben tomarse en cuenta varios aspectos: el aire a utilizar debe poseer una temperatura de bulbo húmedo alta, una entalpía alta, pero una humedad relativa baja puesto que la operación de secado depende del tiempo de contacto aire-producto, del área de contacto (que para nuestro caso requerimos que sean bandejas con finas capas de lecho de

microalgas), el gradiente de temperatura y de humedad y la resistencia. Por eso es importante que el aire no entre frío ni húmedo, ya que esto minimiza el gradiente y elimina la eficiencia del secador.

Esto último es cierto para todos los tipos de secadores, no obstante, es más marcado en este tipo de secador, puesto que en los siguientes, las otras variables no son tan rigurosamente fijas.

## 2. Secador de tambor rotatorio:



*Figura 7. Secador de tambor giratorio por corriente de aire [30]*

El secador de tambor giratorio por corriente de aire combina las ventajas del secador de tambor giratorio con inclinación y secador por corriente de aire, caracterizándose por su uso eficiente de espacio, alta eficiencia, bajo peso, amplio rango de aplicaciones, control de temperatura flexible, etc. Es usado principalmente para secado materiales en hojuelas o fibras con alto grado de humedad, tales como pastos, lechos, hojas y flores.

El secado directo rotativo es la tecnología de secado más conocida. El secado se efectúa por una circulación de aire caliente, en el mismo sentido o sentido opuesto del material orgánico, que se obtiene de un quemador de combustible y que entra al trómel (coraza cilíndrica) impulsado por un ventilador. La temperatura de secado es muy variable, puede ser hasta de 730°C en los gases calientes, aunque para restos orgánicos oscila entre 250 y 400°C, permitiendo secar desde el 20% al 95% de materia seca. Presenta la ventaja de bajos costos y gran capacidad, pero la desventaja de aglomerar material en zonas de la carcasa, con lo que su eficiencia disminuye.

## 3. Secador de lecho fluidizado



*Figura 8. Secador de lecho fluidizado [31]*

El secado mediante lecho fluido pretende eliminar la humedad de un sólido mediante el contacto directo con aire o un gas caliente, para lograr la transferencia de masa y calor necesaria. El fenómeno de la fluidización permite el mayor intercambio posible, ya que el producto a tratar flota en una corriente de aire. Está formado por dos compartimentos separados por una placa de fluidificación sobre la cual se dispone el material que debe secarse. El aire o el vapor recalentado se inyecta por la parte baja, lo que divide y fluidifica el material. La fluidización permite que el producto circule de forma continua a través del lecho fluidizado y desborde por el otro extremo. Las zonas múltiples del secador de lecho fluidizado permiten realizar calentamiento y enfriamiento en la misma unidad. Cada zona tiene un control independiente de temperatura, punto de rocío y velocidad de fluidización. El tiempo de residencia puede variar según el ajuste de la altura de vertedero para cada zona.

#### 4. Secadero neumático



*Figura 9. Secador neumático para industria química [32]*

El modo de funcionamiento es la pulverización del material a secar en una corriente de aire caliente que, en fracciones de segundo, lo seca hasta la sequedad deseada. Son conocidos como transportadores neumáticos. su diseño es complicado pues la pulverización es tecnológicamente difícil. El secado se lleva a cabo en un tubo vertical donde el aire caliente fluye con una velocidad mayor que la velocidad de caída libre de las partículas más grandes del producto húmedo. La alimentación húmeda se introduce en la parte inferior del tubo por medio de un alimentador de tornillo, o de forma neumática. Después de una fase de aceleración corta, las partículas se llevan hacia arriba con la velocidad del aire de secado menos la velocidad de caída libre de la partículas. En el camino, la humedad del producto se evapora en el aire caliente, que de ese modo se enfría.

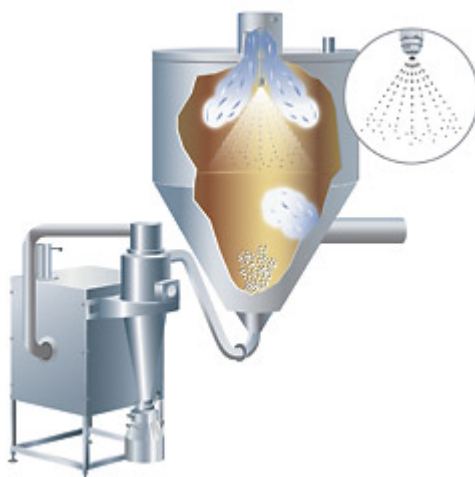
El producto se separa en la parte superior usando ciclones y/o filtros de bolsa. En general después de los ciclones se usan lavadores húmedos o filtros de bolsa para



la limpieza final y el escape de los gases que deberán cumplir con los requisitos estipulados para la emisión de corriente.

Los usos más comunes para éstos secadores son: en la industria química: agente catalítico, fluorito, resina sintética, atlapulgite, tipo dióxido de titanio del rutilo, colorante, sulfato de cobre, fosfato de calcio, hidróxido de bario, etc. En la industria alimentaria: lactato de calcio, producto biológico, alimento a base de gluten de maíz, ácido cyanuric, etc.

## 5. Secador de spray



*Figura 10. Secador en spray [33]*

El producto líquido que se encuentra en el tanque fluye hacia la bomba dosificadora a través de la válvula y filtro, aquí es impulsado por la cañería hasta el atomizador donde es pulverizado por el disco. En este punto se encuentra con el aire y es aquí, en la cámara, donde se produce el secado, luego este producto seco mezclado con el aire de salida se dirige a través del conducto hasta el ciclón que separa el aire del polvo, este último sale mediante la válvula rotativa para su empaque. El aire que realiza el secado es calentado mediante el horno y forzado a través de toda la instalación por el ventilador que lo impulsa hacia la atmósfera. En algunos casos se utilizan toberas en lugar de disco atomizador.

## 2.3 Secadores solares

### 2.3.1 Introducción, concepto y funcionamiento

La energía solar térmica consiste en el aprovechamiento del calor de la radiación solar utilizando colectores solares térmicos, placas solares. A diferencia de la energía solar fotovoltaica, aunque a ambas se le llaman “placas solares”, en la energía solar térmica se aprovecha el calor y en la energía solar fotovoltaica se aprovecha la luz solar.

En aplicaciones donde es necesario el uso de aire caliente, los colectores solares de aire son una alternativa a tener en cuenta. Los principios básicos de operación son similares a los de los colectores de agua, pero en este caso se usa un ventilador eléctrico para realizar el movimiento del aire. Son varias las ventajas derivadas del uso de colectores solares de aire para el secado de microalgas. Como la temperatura del aire de secado a altas temperaturas es superior a la temperatura de salida de aire de los colectores, no hace falta ninguna unidad de almacenamiento de calor, todo el aire caliente generado por los colectores va directo al secado de los lechos de algas y por tanto es calor útil. En muchas instalaciones, el aire caliente que viene de los colectores se une al efecto que se consigue con el quemador a la entrada de la cámara de secado para conseguir la temperatura de aire de secado deseada, y así reducir el combustible consumido por el quemador. En nuestro caso, con la integración de colectores solares de aire para el secado de microalgas queremos eliminar el consumo de combustible pues desaparece el quemador, de tal forma que únicamente el aire caliente procedente de los colectores será el utilizado para alcanzar la temperatura de secado establecida.

### 2.3.2 El colector solar, características y tipos

El colector solar es un dispositivo encargado de captar la energía que viene de la radiación solar y transferirla al fluido que pretende calentarse (en éste proyecto será el aire). Es por tanto una especie de intercambiador de calor que transforma la radiación solar en calor. El flujo de irradiación que le llega es del orden de  $1100 \text{ W/m}^2$  como máximo y es variable, en función de la zona geográfica en que se encuentre, temperatura, materiales, etc.

Los colectores solares planos se pueden diseñar para calentar fluidos (agua y aire son los más comunes) hasta temperaturas moderadas, alrededor de  $100^\circ\text{C}$  como máximo sobre la temperatura ambiente. Aspectos positivos de éstos aparatos es que pueden usar tanto la componente directa como la difusa de la radiación solar, requieren de poco mantenimiento y no necesitan un seguimiento del sol. Los colectores solares planos se clasifican dependiendo del fluido de trabajo que emplean: colectores solares de líquido y colectores solares de aire. Los colectores solares de líquido se emplean más para ACS (Agua Caliente Sanitaria) y calefacción, mientras que los de aire se emplean más para el secado de productos, como es el caso de éste proyecto.

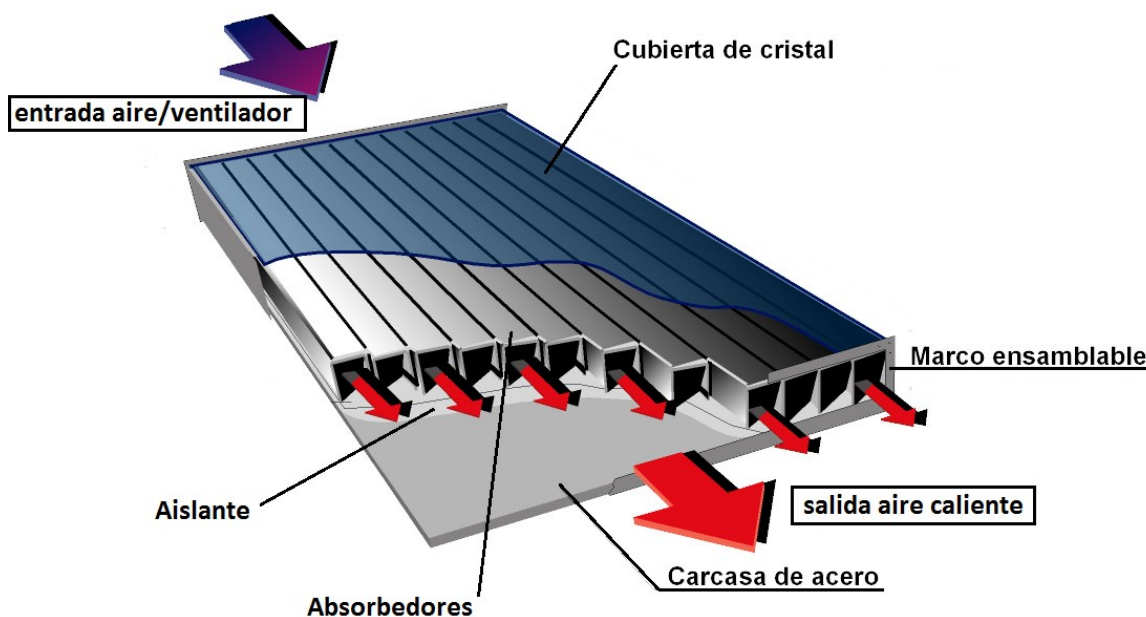


Figura 11. Esquema básico de un colector plano de energía solar [34]

## Colectores solares de aire y de líquido

La principal diferencia entre ambos colectores está en el fluido transportador de calor que circula por su interior y sus diferentes propiedades físicas.

El agua posee algunas ventajas frente al aire en cuanto a su capacidad para llevar calor, pues puede transportar más calor por unidad de masa que el aire (su calor específico es de 1 cal/gr frente a la del aire que es de 0.24 cal/gr). Por otro lado la densidad del agua es también mayor que la del aire, lo que implica que a la hora de transportar una cantidad de calor determinada, se necesitará emplear bastante más volumen de aire que de agua.

Por otro lado, el aire también tiene ciertas ventajas respecto al agua para las instalaciones de calefacción por energía solar: es un elemento que es inmune al congelamiento y a la ebullición por lo que hay determinados dispositivos y medidas de precaución que se adoptan en las instalaciones de agua para evitar efectos nocivos y accidentes que no serán necesarios considerar en las instalaciones con aire; al trabajar en circuito abierto con la atmósfera, no existen problemas de fugas; además

En cuanto a las instalaciones solares, las que funcionan con aire son más sencillas y simples que las de agua pues resulta mucho más sencillo hacer circular el aire a calentar por los colectores solares ya que sólo se requiere para ello los colectores, los conductos y un ventilador. Sin embargo, las instalaciones de calefacción por agua requieren de muchos más elementos. Por ejemplo, por las noches la instalación está expuesta a sufrir bajas temperaturas y será necesario un circuito primario con agua y anticongelante que evite la congelación del agua en los colectores y por tanto su rotura. Al mismo tiempo, como el anticongelante es tóxico se debe instalar un circuito secundario, con su respectivo intercambiador de calor, que comunique con el depósito acumulador de agua. Las instalaciones de calefacción solar por agua requieren una instalación más compleja a

tener en cuenta para nuevas construcciones, y es complicada su colocación en antiguos edificios. En cambio las instalaciones por aire son posibles de realizar en edificios o instalaciones ya existentes.

Los colectores solares de líquido se emplean normalmente para calefacción y Agua Caliente Sanitaria (ACS), mientras que los de aire se usan principalmente para el secado de productos agrícolas, granos, lechos, etc, o como en éste proyecto, para el secado de microalgas.

## Colectores solares empleados en el secado

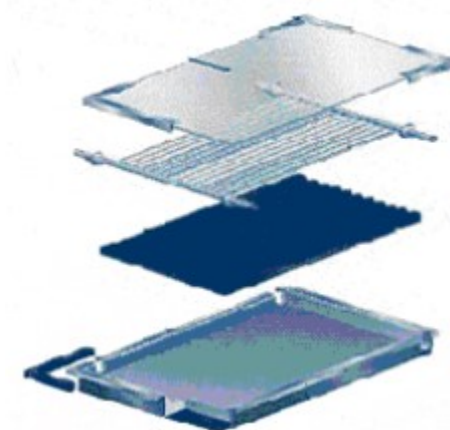
Para el correcto funcionamiento de los sistemas es esencial el correcto diseño de los colectores de aire instalados antes de la cámara de secado.

El elemento principal de una instalación de energía solar es el colector solar o convertidor, cuyo objetivo es transformar la energía solar en energía térmica y transferir este calor al fluido térmico que circula en su interior, que en éste caso será el aire.

### Componentes

Tanto de agua como de aire, el diseño más común de los colectores solares presenta las siguientes partes [35] :

- Cubierta transparente
- Circuito del fluido
- Absorbedor
- Aislamiento
- Carcasa



*Figura 12. Componentes de un colector solar [36]*

#### Cubierta transparente

Sus funciones son atenuar las pérdidas de calor del absorbedor impidiendo el paso de las radiaciones que éste emite y evitar que el aire exterior esté en contacto con el absorbedor y provoque en él pérdidas por convección.

Para atenuar las pérdidas de calor por radiación que salen de la superficie del absorbedor se coloca una capa de material transparente ya sea plástico o vidrio, que permite el paso de las radiaciones de longitud de onda corta pero no las de longitud de onda larga. De ésta forma las radiaciones solares ultravioleta, visible e infrarrojo de longitud de onda corta pueden llegar al absorbedor pero las que están en el infrarrojo, que son de mayor longitud de onda, no atraviesan la cubierta transparente. Ésta reflexión de ondas produce un incremento en la temperatura del absorbedor, beneficioso para calentar el fluido. Las

cubiertas pueden ser de vidrio o plástico, aunque el plástico es poco recomendable pues envejece bajo la acción de los rayos ultravioletas y se requiere renovarlo frecuentemente.

La radiación infrarroja que emite el absorbedor calienta la cubierta transparente y ésta emite radiaciones hacia el absorbedor como al exterior. La transmisividad del cristal  $\tau$  indica la cantidad de radiación que deja pasar, y es función de la calidad del mismo y del ángulo con el que incide la radiación solar. Por ejemplo, para un ángulo de incidencia perpendicular a la superficie del cristal, la transmisividad del cristal está en torno al 93%, es decir, deja pasar el 93% de la energía solar que incide sobre la cubierta.

Se debe tener en cuenta que la cubierta debe ser completamente estanca para así evitar que se introduzcan partículas de polvo y humedad que provocarían un deterioro del colector y un menor rendimiento.

### Circuito de fluido

Entre el circuito del fluido y el absorbedor debe existir un contacto directo para que la transmisión de calor absorbedor-fluido se dé en las condiciones más óptimas. En los colectores de líquido el circuito se compone de una serie de tuberías por las que circula dicho fluido. En los colectores de aire, como el que se propone en el proyecto, el fluido circula entre la cubierta y el absorbedor.

### Absorbedor

Es el componente encargado de absorber la radiación solar. Se fabrica con diferentes materiales como plástico, cobre, acero o aluminio, aunque el aluminio sufre corrosión y no se aconseja destinarlo a tal uso. El absorbedor está pintado de color oscuro para mejorar su capacidad de absorción de la radiación solar, y para conseguir que ésta radiación se aproveche al máximo, la reflexión en su superficie debe ser muy baja. También se deben elegir correctamente los materiales y pinturas que se usarán, pues debe tenerse en cuenta que se pueden alcanzar temperaturas del orden de los 100°C.

A la hora de elegir la pintura del absorbedor, se tendrán en cuenta las longitudes de onda del infrarrojo, el visible y el ultravioleta, y la máxima emisión del sol, pues el coeficiente de absorción  $\alpha$  de la pintura será elevado, del orden de 0.9 - 0.95.

Las radiaciones emitidas por la placa absorbente se deben limitar al máximo para mantener una temperatura alta en el absorbedor, por lo que deben emplearse pinturas que cumplan dicho objetivo. Éstas pinturas tienen que ser selectivas, es decir, tienen que poseer un gran coeficiente de absorción para las longitudes de onda del espectro solar y muy bajo poder emisivo para los infrarrojos que emite el absorbente, así podrán absorber efectivamente la radiación solar mientras que irradian calor en pequeña proporción.

### Aislamiento térmico

Tiene como objetivo evitar en lo posible las pérdidas de calor desde el circuito del fluido hacia el exterior, por lo que ha de ser un material de bajo coeficiente de conductividad. Para su elección se deben tener en cuenta factores tales como la densidad, la temperatura máxima de servicio, el comportamiento ante la humedad, la estabilidad térmica, el coste, etc.

### Carcasa

Contiene el conjunto de elementos que forman el colector y asegura su estanqueidad, tanto a efectos de pérdidas de calor como de penetración de humedad, aire exterior, impurezas, etc. Si deja pasar aire, circulará por el colector causando pérdidas de calor.

La ‘caja’ soportará las condiciones ambientales/climáticas propias del lugar de emplazamiento del colector, y serán más o menos corrosivas en función de los componentes presentes en la atmósfera. Es conveniente que las instalaciones de energía solar duren a largo plazo, por lo que la calidad de los materiales será la adecuada para que la caja se deteriore lo mínimo posible con el paso del tiempo. Suelen fabricarse de acero galvanizado con tratamiento de anodizado, pero no es aconsejable utilizar materiales como la madera ni plásticos, que se degradan con facilidad [35].

## **2.4 Modelado y Simulación de procesos**

### **2.4.1 Concepto y Objetivos**

La deshidratación de las algas es un proceso complejo que involucra simultáneamente los fenómenos de transferencia de energía y masa. El entendimiento de los diferentes mecanismos involucrados dentro éste tipo de vegetales y entre éstos y el ambiente circundante, así como el conocimiento de las propiedades termofísicas, de equilibrio y de transporte de ambos sistemas son requeridos para modelar y simular el proceso (Bruin y Luyben, 1980; Okos y col., 1992; Crapiste y Rotstein, 1997).

Los modelos existentes para modelar la transferencia de masa del proceso de secado por convección abarcan una amplia gama de enfoques y formas.

### **Objetivos**

La búsqueda de alternativas para el estudio del fenómeno de secado, ha sido planteada a través de metodologías tradicionales, tales como el uso de secadores en lechos fijos en los que se manejan flujos de aire en una sola dirección. Esto trae consigo en muchas ocasiones la contracción y el agrietamiento del producto durante su deshidratación originando un aumento de tiempo y costo en el proceso de elaboración de un producto. Una manera económica de evitar gradientes excesivos de contenido de humedad y temperatura en el producto a secar, consiste en cambiar o invertir la dirección del flujo del aire periódicamente en el secado, tomando en cuenta la profundidad del lecho, el espesor de la partícula, la velocidad y la temperatura de aire de secado.

Por éstas razones anteriores se tomaron en cuenta las variables de secado, que son parámetros significativos en el secado por lotes en lechos fijos con un flujo de aire. Es de gran importancia y valor efectuar una predicción del secado de productos

empleando un flujo de aire el cual proporcione información sobre su comportamiento, lo que permita reducir tiempos, costos y ahorro de energía en el proceso de este producto. Por lo que este trabajo es una propuesta de simular el secado de microalgas a través de un secador solar con un flujo de aire dado por un ventilador que permita conocer a nivel de laboratorio los efectos que tienen los diversos parámetros de operación del secado en un producto, en éste caso una microalga. Así como determinar las mejores condiciones del secado utilizando un programa de simulación y optimización desarrollado en un lenguaje de programación, el programa MATLAB®. Esto se logró en el presente proyecto ajustando cinéticas de secado con un flujo de aire específico bajo diferentes condiciones de secado.

## 2.4.2 Herramienta empleada en el modelado y la simulación de procesos

### El Software

A lo largo de la elaboración de éste proyecto, la herramienta informática que se ha empleado para realizar los cálculos numéricos, gráficas, los ajustes de las distribuciones y la simulación del modelo matemático que permite visualizar el comportamiento de un secadero de algas ha sido el programa MATLAB®.

**MATLAB®** (abreviatura de *MATrix LABoratory*) es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones (gráficas), la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

Su historia va camino de cumplir casi 40 años de antigüedad, fue creado por el matemático y programador de computadoras Cleve Moler en 1984, surgiendo la primera versión con la idea de emplear paquetes de subrutinas escritas en el lenguaje de programación Fortran en los cursos de álgebra lineal y análisis numérico, sin necesidad de escribir programas en dicho lenguaje. El lenguaje de programación M fue creado en 1970 para proporcionar un sencillo acceso a otros software de matrices.

La popularidad y utilidad del programa fue creciendo hasta tal punto que en 2004, se estimaba que MATLAB® era empleado por más de un millón de personas en ámbitos académicos y empresariales.

## La Características más relevantes de MATLAB®

**Lenguaje:** Las aplicaciones de MATLAB® se desarrollan en un lenguaje de programación propio. Este lenguaje es interpretado, y puede ejecutarse tanto en el entorno interactivo, como a través de un archivo de script (archivos \*.m). Este lenguaje permite operaciones de vectores y matrices, funciones, cálculo lambda, y programación orientada a objetos.

**Gráficos e interfaces gráficas:** MATLAB® provee funciones para visualizar datos en 2D y 3D.

**Simulink:** es un módulo que permite la simulación de sistemas dinámicos a través de una interfaz basada en bloques.

**Toolboxes:** Las funcionalidades de MATLAB® se agrupan en más de 35 toolboxes y paquetes de bloques (para el módulo Simulink)

El paquete MATLAB® dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB® con las *cajas de herramientas (toolboxes)*; y las de Simulink con los *paquetes de bloques (blocksets)*.

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL.

### 2.4.3 Ejemplos y aplicaciones del modelado y la simulación

#### Ventajas

La simulación es conveniente cuando:

- No existe una formulación matemática analíticamente resoluble.
- Existe una formulación matemática, pero es difícil obtener una solución analítica. Los modelos matemáticos utilizados para modelar un reactor nuclear o una planta química son imposibles de resolver en forma analítica sin realizar serias simplificaciones.
- No existe el sistema real. Es problema del ingeniero que tiene que diseñar un sistema nuevo. El diseño del sistema mejorará notablemente si se cuenta con un modelo adecuado para realizar experimentos.
- Los experimentos son imposibles debido a impedimentos económicos, de seguridad, de calidad o éticos. En este caso el sistema real está disponible para realizar experimentos, pero la dificultad de los mismos hace que se descarte esta opción. Un ejemplo de esto es



la imposibilidad de provocar fallos en un avión real para evaluar la conducta del piloto, tampoco se puede variar el valor de un impuesto para evaluar la reacción del mercado.

-El sistema evoluciona muy lentamente o muy rápidamente. Un ejemplo de dinámica lenta es el problema de los científicos que estudian la evolución del clima. Ellos deben predecir el clima dadas las condiciones actuales, no pueden esperar a que un tornado arrase una ciudad para luego dar el mensaje de alerta. Por el contrario, existen fenómenos muy rápidos que deben ser simulados para poder observarlos en detalles, por ejemplo una explosión.

## Desventajas

Posibles desventajas de la simulación:

-El desarrollo de un modelo puede ser costoso, laborioso y lento.

-Existe la posibilidad de cometer errores. No se debe olvidar que la experimentación se lleva a cabo con un modelo y no con el sistema real; entonces, si el modelo está mal o se cometen errores en su manejo, los resultados también serán incorrectos.

-No se puede conocer el grado de imprecisión de los resultados. Por lo general el modelo se utiliza para experimentar situaciones nunca planteadas en el sistema real, por lo tanto no existe información previa para estimar el grado de correspondencia entre la respuesta del modelo y la del sistema real.

## Campos de aplicación

Actualmente la simulación da servicio casi todas las áreas posibles, algunas de ellas:

-Procesos de manufacturación: detecta cuellos de botella, distribución del personal, política de producción.

-Plantas industriales: establecer condiciones óptimas de operación, elaboración de procedimientos de operación y de emergencias.

-Sistemas públicos: demanda de energía, comportamiento del clima, propagación de enfermedades.

-Sistemas de transportes: zonas de posible congestionamiento, zonas con mayor riesgo de accidentes

-Construcción: efecto de los vientos y temblores, condiciones de iluminación y condiciones ambientales

-Diseño: Permite la selección adecuada de materiales y formas, sensibilidad del diseño con respecto a parámetros no controlables.

-Educación: excelente herramienta para comprender un sistema real debido a que se puede expandir, comprimir o detener el tiempo, y da información sobre variables que no pueden ser medidas en el sistema real.

-Capacitación: Dado que el riesgo y los costos son casi nulos, una persona puede utilizar el simulador para aprender por sí misma utilizando el método más natural para aprender: el de prueba y error[37].

# **Parte II**

## **CASO PRÁCTICO**

### **-Modelado y Simulación-**

## Capítulo 3

# Modelado y Simulación numérica del secador de algas

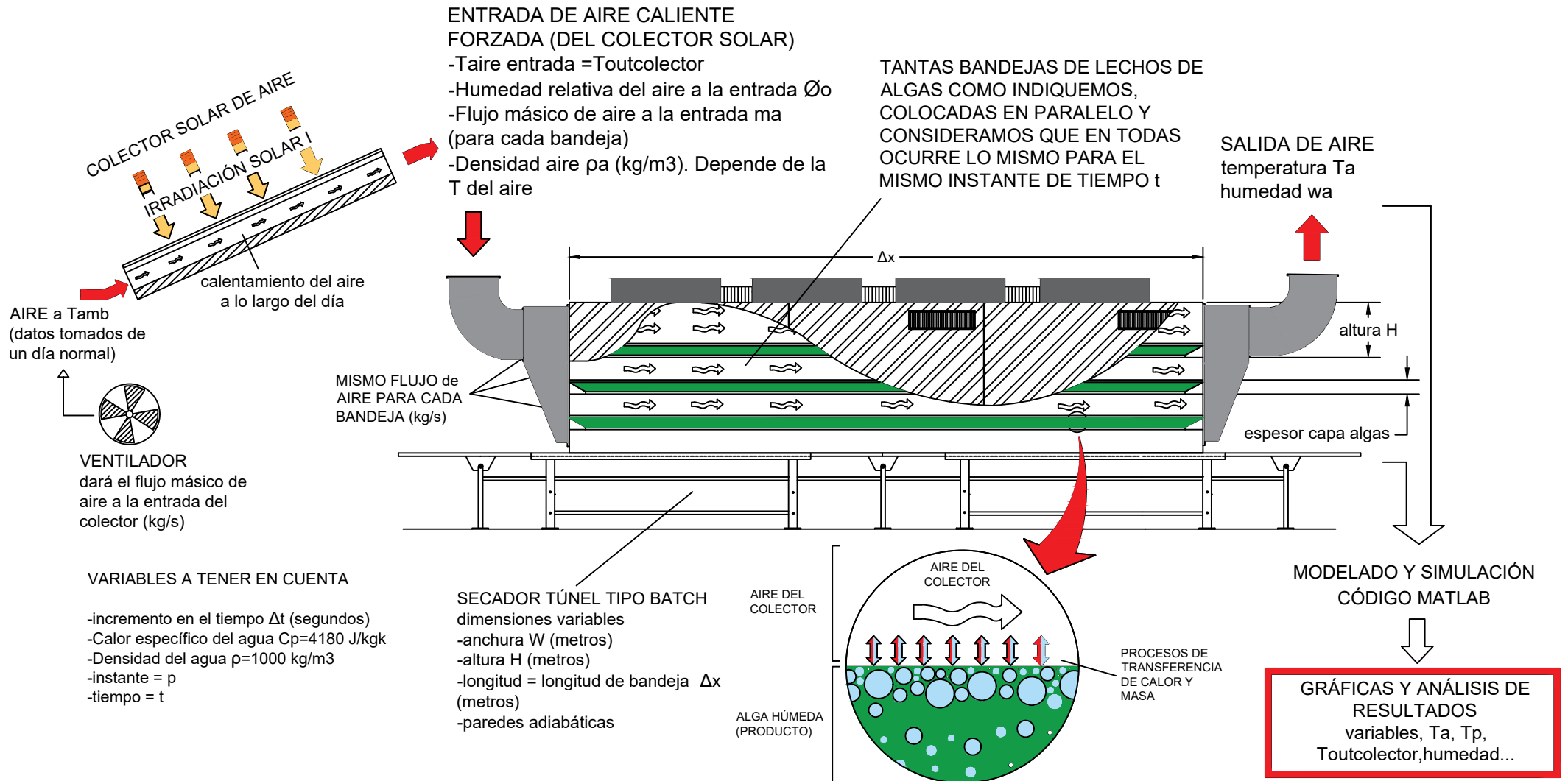
### 3.1 Descripción del caso práctico

El caso práctico que se describe a continuación pretende unir de forma coherente los conceptos teóricos anteriormente explicados en la Parte I Marco Teórico de tal forma que el resultado permita simular y modelar en el futuro instalaciones similares ya existentes ó en fase de proyecto, sin necesidad de crear la instalación desde cero ni de realizar importantes inversiones económicas para modificar aspectos de instalaciones ya creadas.

En nuestro caso queremos simular el proceso de secado con aire que se puede aplicar sobre un lecho de algas distribuido en bandejas cuyas dimensiones de ancho y largo coincidirán con la cámara de secado. El objetivo de secar las algas es extraer el agua contenida en su interior para conseguir un producto con menos humedad pero más contenido en lípidos, cuyos usos energéticos pueden ser muy diversos. Para ello, el aire empleado en secar el alga y que circulará por el secadero vendrá de un colector solar de aire cuya salida se comunicará directamente con la entrada del túnel de secado. En el siguiente esquema se explica el proceso completo:

*Figura 13. Esquema completo del caso práctico, (Autocad)*

# ESQUEMA DETALLADO DEL CASO PRÁCTICO



El colector solar de aire capta la radiación solar y aumenta la temperatura del aire (impulsado por un ventilador a un flujo determinado) en su transcurso por el interior del colector. El aire caliente que sale con un flujo suficiente para conseguir en cada bandeja los flujos deseados se dirige a la entrada de la cámara de secado. El caudal de aire requerido para el colector será la suma de los caudales de aire correspondientes a cada una de las bandejas ó 'batch' colocadas en paralelo en la cámara de secado, pues se ha considerado que a cada bandeja le llega el mismo caudal, y todas tendrán las mismas condiciones de entrada y salida. Las muestras de algas se depositaron en bandejas idénticas de acero reforzado con placas de aluminio donde la altura del lecho de algas a secar se mantiene constante.

La cámara de secado consiste en un compartimento de secado prismático de base rectangular con ingreso de aire procedente del colector por uno de sus extremos, y la salida por el extremo opuesto.

Como el caudal de aire requerido para el secado es el proporcionado por el colector, no hace falta un ventilador adicional para impulsar más aire hacia el secador. Una vez el aire se introduce en el túnel de secado, atraviesa el lecho de algas humidificándose y disminuyendo la humedad y el agua de los lodos de algas.

Dentro del secadero se producirá un mecanismo de convección entre el alga y el aire circulante del túnel del secador, una transferencia de calor entre la superficie del alga y el fluido, el aire. La distribución de la  $T$  a lo largo del túnel sí cambia con el tiempo, por lo que no podemos despreciar los términos estacionarios.

Gracias a una apertura conducida en la parte trasera de la cámara de secado, el aire sale hacia el exterior a una temperatura  $T_a$  variante con el tiempo, al igual que podremos analizar la humedad  $M$  del alga, su temperatura  $T_p$ , etc.

Para facilitar el estudio del proceso en todo el secador, emplearemos la discretización del sistema en instantes de tiempo  $p$  ordenados que nos permitirán resolver problemas más simples para llegar a la solución general de todo el sistema.

Una vez consumido el tiempo de secado dentro de la cámara, se retiran las bandejas con la masa de algas seca y se deja reposar a temperatura ambiente. Después se transportarán hacia una zona de almacenamiento donde se recogerán en grandes cantidades, esperando ser utilizadas en la producción de biocombustible, cosméticos, etc.

### ASPECTOS A TENER EN CUENTA

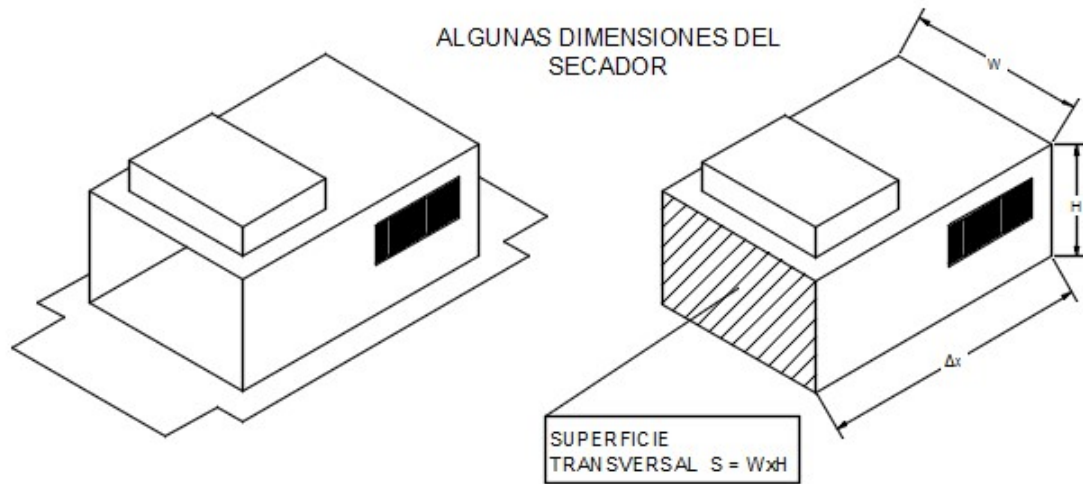


Figura 14. Dimensiones del secador a tener en cuenta, (Autocad)

Las paredes laterales del secador se podrán considerar adiabáticas, es decir, no existirá intercambio de energía en esas paredes con el exterior, por lo que la energía se conservará..

Respecto a la capa delgada de producto:

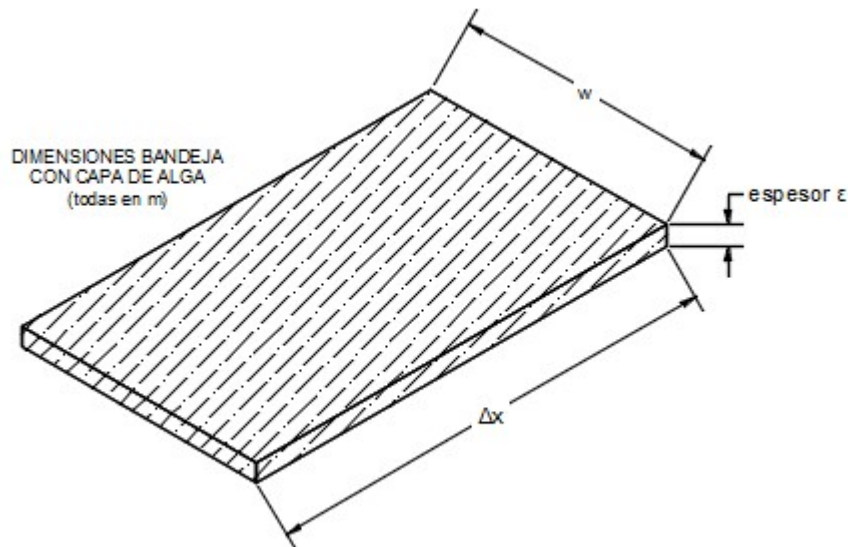


Figura 15. Dimensiones bandeja de microalgas (Autocad)

$\text{área del producto } A_p = \text{ancho} * \text{largo} = W * \Delta x$   
 $\text{volumen del producto } V_p = \text{ancho} * \text{largo} * \text{espesor} = W * \Delta x * \varepsilon$

$$\text{relación } a_p = \frac{A_p}{V_p} = \frac{W * \Delta x}{W * \Delta x * \varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon}$$

El procedimiento que llevaremos a cabo para los cálculos se basará en determinar el instante  $p$  partiendo del instante anterior  $p-1$  ya conocido, de tal forma que siempre necesitaremos información de lo que ha ocurrido en el instante inmediatamente anterior. Consiste en una discretización unidimensional (pues es en el tiempo) del proceso de secado que está ocurriendo dentro de la cámara de secado.

### C.I. CONDICIONES INICIALES

A la entrada ( $t=0$  y  $p=1$ ) suponemos las siguientes condiciones

El aire entrará al colector a una temperatura concreta cogida de una base de datos de un registro de temperaturas en un día típico

$$\text{El Aire: } T_0 \text{ en } ^\circ\text{C}$$

La humedad específica del aire ó el contenido de agua en aire  $w_{a_0}$ , supondremos un valor constante de  $w_0 \approx 7.5 \frac{\text{gr agua}}{\text{kg aire seco}} = 0.0075 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}}$

éste valor es perfectamente posible dadas las condiciones climáticas que tiene el aire en Madrid y podemos suponerlo constante para todo el proceso.

Entonces tenemos lo siguiente

$$\text{humedad inicial del lecho de algas (normalizada)} MR = x_0 = 1$$

$$w_{a_{entrada}}^0 = w_0 = 7.5 \frac{\text{gr}}{\text{kg}} \text{aire seco} = 0.0075 \text{kg}$$

Las condiciones Iniciales son en el tiempo, que sería el inicio del proceso. Las de contorno son en el espacio, en éste caso la entrada a la cámara de secado, pues son las condiciones que da el colector solar. Para determinar las condiciones de contorno se estudia el proceso térmico que tiene lugar en el colector, pues las condiciones a la salida de éste son las condiciones de contorno en la cámara.

### C.C. CONDICIONES DE CONTORNO

$$T_{a_{colector}}^0 = \text{dato concreto en función de la hora del día}$$

$$T_{outcolector} = f(t)$$

$$\text{longitud bandeja algas } \Delta x = 1 \text{ m (aunque se puede variar)}$$

$$\text{Incremento del tiempo } \Delta t = 3 \text{ seg, intervalo entre instantes } p$$

$$\text{flujo másico entrada al colector } m_{a_{colector}} = n * \dot{m}_a \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

donde  $n$  son el número de bandejas de algas colocadas en paralelo

## 3.2 El Modelo matemático

### 3.2.1 Obtención de las ecuaciones

#### El método

En éste apartado se va a explicar cómo se ha llegado a las ecuaciones finales que nos permiten obtener los valores de la humedad y las temperaturas en el aire y en el producto (algas), entre otras variables que se van a analizar, a lo largo del tiempo durante el proceso de secado.

Para comenzar debemos explicar que trabajaremos con métodos numéricos, pues son útiles a la hora de resolver problemas de transferencia de calor, dinámica de fluidos, y otras ecuaciones diferenciales que modelan problemas físicos; sobre todo cuando éstos problemas no pueden ser resueltos con técnicas de análisis exacto (pues pueden presentar geometrías complejas, involucran ecuaciones diferenciales no lineales...).

En la actualidad, la cantidad de problemas que se abordan numéricamente aumentan día a día ya que los resultados se ajustan cada vez más a la realidad.

El proceso por medio del cual se obtiene la solución aproximada de un problema gobernado por una ecuación diferencial en derivadas parciales, está constituido por dos etapas que esquemáticamente se muestran en la siguiente figura. La primera etapa, llamada **discretización**, consiste en transformar el dominio continuo en una malla de nodos, para luego convertir a la ecuación diferencial parcial continua y a las condiciones auxiliares, ya sean de frontera o iniciales, en un sistema de ecuaciones algebraicas.

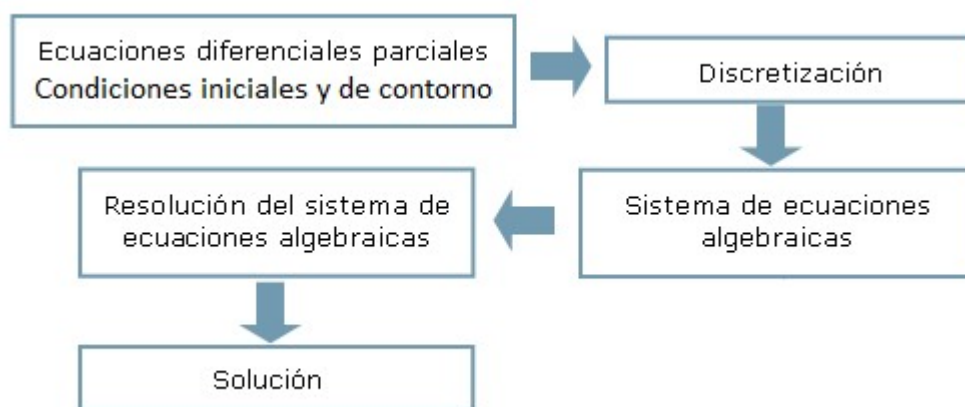


Figura 16. Diagrama básico para la creación del modelo matemático

La segunda etapa del proceso de aproximación requiere un método adecuado para obtener la solución del sistema de ecuaciones algebraicas planteado.



Existe una gran variedad de métodos numéricos para resolver las ecuaciones diferenciales parciales. No obstante, los más usados en la actualidad son el *Método de diferencias finitas* y el *Método de elementos finitos*

En nuestro caso emplearemos el *Método de diferencias finitas MDF* para obtener una solución aproximada de las ecuaciones. Las bases de éste método consisten en la construcción de una malla de una manera estructurada con los nodos de la misma en un espacio  $n$  dimensional, donde se llevará a cabo el reemplazo de las derivadas continuas de la ecuación diferencial por las expresiones equivalentes en diferencias finitas y la resolución del sistema de ecuaciones que queda planteado como consecuencia de la anterior sustitución.

El *MDF* es, tal vez, el método más simple para aplicar sobre mallas con una geometría uniforme. Su mayor desventaja consiste en su incapacidad para tratar la solución de problemas sobre formas geométricas irregulares. Nuestro caso práctico plantea una capa de algas delgada y de espesor constante, por lo que podemos considerar una **geometría uniforme**.

Para obtener la solución numérica de una ecuación diferencial en derivadas parciales utilizando el *MDF* se debe, como primer paso, **discretizar el dominio a lo largo del tiempo**.

Si la discretización fuera bidimensional y nos moviéramos a lo largo del espacio y del tiempo, usaríamos dos índices,  $p$  y  $n$ , donde  $p$  indica el instante en el tiempo en el que nos encontramos y  $n$  el nodo en el espacio estudiado en ése momento. **Se va a discretizar en una dimensión, el tiempo**. Justo en el instante inicial ( $p=0$ ), daremos los valores iniciales de las variables de entrada para el instante inicial  $p$ , por lo que podremos calcular todas las variables de forma directa, pero necesitaremos realizar cálculos para el resto de instantes  $p$ , de tal forma que podamos ver la evolución de la humedad, temperatura del aire, temperatura de las algas, etc, a lo largo del tiempo.

En los instantes posteriores al ‘instante inicial’ siempre tendremos las siguientes condiciones:  $t > 0$  y conocemos los datos en el instante anterior ( $p-1$ ). Siempre necesitaremos de lo que ocurre en el instante inicial para poder calcular el resto de instantes en base a él.

De las muchas variables a analizar en el estudio, conviene mencionar las siguientes por su importancia en el resultado final:

- $MR = \text{Moisture Ratio} \equiv$   
*Ratio de humedad en el lecho de algas, normalizado entre 1 y 0*
- $T_{outcolector} =$   
*Temperatura a la salida del colector solar, en función del momento del día (en K)*
- $n_w = \text{velocidad ó ritmo de evaporación del agua por unidad de área } (\frac{kg}{m^2 \cdot s})$
- $w_a = \text{agua en aire de secado, es decir, kg de agua por kg de aire, adimensional}$
- $T_a = \text{temperatura del aire que circula por la cámara de secado (en K)}$
- $T_p = \text{temperatura de la capa de producto, es decir, T de las algas (en K)}$

## El colector solar de aire

Para seguir con el orden natural del proceso, comenzaremos con el estudio del **colector solar de aire**.

La variable objetivo que queremos calcular es  $T_{outcolector}$ , que es la T a la que sale el aire a la salida del colector, en Kelvin. Para calcular ése valor definiremos antes otras variables:

$\eta_{colector} \equiv$  rendimiento del colector

$$\eta_{colector} = \frac{\dot{m}_{airecolector} * C_{p_{aire}} * (T_{outcolector} - T_{entrada})}{I * A_{colector}}$$

donde:

$T_{entrada} \equiv$  Temperatura de entrada al colector  $\approx T_{ambiente}$  (en K)

ésta temperatura la tomaremos como dato de temperatura ambiente típica a lo largo de un día en la ciudad de Madrid, valores cada hora.

$I \equiv$  irradiación solar incidente sobre el colector (en  $\frac{W}{m^2}$ )

al igual que con la temperatura de entrada, tomaremos como datos las irradiaciones típicas que hay en un día en Madrid, valores cada hora.

$\dot{m}_{airecolector} \equiv$  flujo másico de aire que entra y sale del colector (en  $\frac{Kg}{s}$ )

éste flujo de aire dependerá directamente del flujo másico de aire deseado en cada una de las bandejas de la cámara de secado, su cálculo será:

$$\dot{m}_{airecolector} = n * \dot{m}_{airebandeja}$$

$n \equiv$  nº bandejas de algas en el secadero

$C_{p_{aire}} \equiv$  poder calorífico del aire (en  $\frac{J}{kg * K}$ )

el poder calorífico del aire variará en función de la T de entrada del aire citada anteriormente, mediante una correlación

$A_{colector} \equiv$  área del colector solar (en  $m^2$ )

$T_{outcolector} \equiv$  temperatura de salida del aire del colector, en K

ésta temperatura será la misma que la T de entrada del aire del secadero, de ésta forma el funcionamiento de un colector solar afectará a la forma de secarse de las algas.

de la ecuación anterior, despejamos la  $T_{outcolector}$

$$T_{outcolector}(i) = \frac{\eta_{colector} * A_{colector} * I(i)}{\dot{m}_{airecolector} * C_{p_{aire}}} + T_{amb}(i)$$

el índice (i) indica que para cada hora del día le corresponde un valor de irradiación  $I$  y otro de  $T_{amb}$  (tomados de una base de datos científica), que darán un valor de  $T_{outcolector}$  para cada valor de tiempo  $t$ .

Un valor de rendimiento del colector razonable es  $\eta_{colector} = 0.75$ . Aparece como valor típico en varios casos de artículos y libros científicos. [38]

Así conseguimos representar la temperatura a la salida del colector en función de la hora del día a la que nos encontremos:

$$T_{outcolector} = f(t)$$

## La Cámara de secado, ecuaciones asociadas

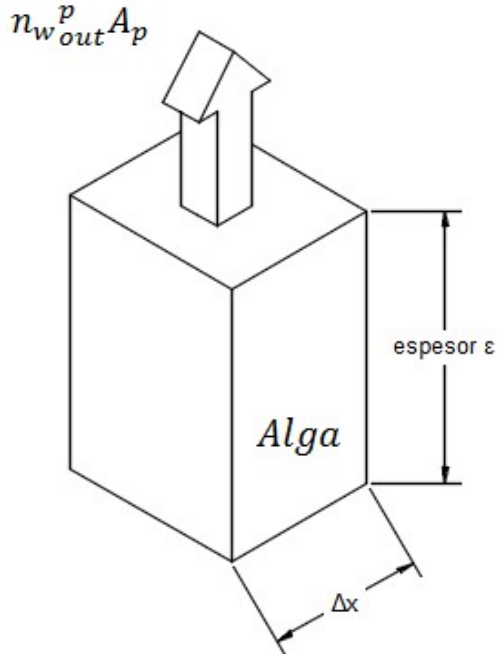
En éste punto tenemos una temperatura a la entrada del secadero de algas, que será  $T_{outcolector}$ , ahora necesitamos estudiar cómo se comporta el lecho de algas húmedo en presencia de un aire cuya temperatura varía en función del momento del día, y todo ello discretizándolo a lo largo del tiempo, es decir, estudiaremos lo que ocurre para cada instante de tiempo  $p$  en toda la bandeja/bandejas de algas que tengamos en la cámara de secado (considerada todo un lote), cómo varía su contenido en agua, sus temperaturas, tanto del alga como del aire, etc.

Para la obtención de los valores de las variables anteriormente descritas  $n_w$ ,  $w_a$ ,  $T_a$  y  $T_p$  se aplicarán las ecuaciones de balance de materia (masa de agua) y energía (calor) al proceso de secado, siempre teniendo en cuenta que lo estamos calculando para un instante de tiempo  $p$  concreto. En las siguientes páginas se incluyen dichos balances y su desarrollo paso a paso con las ecuaciones que se han necesitado aplicar para obtener las variables anteriormente mencionadas.

Dichas ecuaciones se aplicarán a un instante en concreto  $p$  para toda la bandeja de lecho de algas, considerada como un lote individual, y de éste se generará una secuencia repetitiva del mismo procedimiento que se aplicará al resto de instantes  $p$  a lo largo del tiempo que especifiquemos, pues podremos elegir durante cuánto tiempo podemos analizar las variables.

## 1) Resolución de $n_w$

Nos colocamos en el lecho de microalgas, también llamado ‘producto’ y planteamos un **Balance de Masa**, en el que se estudiará el **contenido de agua en el lecho de algas**. Ésta situación puede representarse así[45]:



si nos centramos en la masa del producto, consideraremos que la masa de agua es prácticamente la masa de microalga, y sólo saldrá agua hacia el exterior (el aire circundante por la cámara) y si planteamos el balance de masa tendremos lo siguiente:

$$\frac{\Sigma dm_w}{dt} = \dot{m}_{entra} - \dot{m}_{sale}$$

\*no se tiene en cuenta el término de generación pues no existe reacción química

Figura 17. Detalle para el balance de masa en el alga

Recordamos que la masa es la masa de agua existente en el producto, en la capa de algas. Explicamos los términos del balance:

-Si nos fijamos en los términos de la derecha:

$\dot{m}_{entra} = 0$  ; como es lógico en un proceso de secado el producto pierde agua, no lo gana, por lo que no hay masa de agua que entre.

$\dot{m}_{sale} = n_w^p A_p$  ; cantidad de agua que sale a través de la superficie del producto, por unidad de tiempo (pues es un flujo másico en kg/s)

$$A_p = \text{área del lecho de algas} = \text{ancho} \times \text{largo} = W * \Delta x$$

-los términos de la izquierda:  $\frac{\Sigma dm_w}{dt}$

tenemos el sumatorio de la masa de agua en el alga  $m_w$  en función del tiempo, si definimos

$$w_p = X^p \equiv \text{contenido en agua ó humedad} \rightarrow$$

$$\text{en base húmeda } w_p = X^p = \frac{m_{\text{producto}} - m_{\text{seca}}}{m_0}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{producto}} &= m_p = \text{masa de alga con agua} \\ m_{\text{seca}} &= \text{peso del alga sin considerar el agua} \\ m_0 &= \text{masa en el instante inicial, que será } = m_p \end{aligned}$$

$$m_{\text{producto}} - m_{\text{seca}} = m_w = \text{masa de agua contenida en el producto}$$

$$w_p = \frac{m_w}{m_0}$$

$$m_w = m_p w_p \text{ entonces}$$

$$\frac{\sum dm_w}{dt} = \sum \frac{dm_p w_p}{dt} = m_p \frac{dw_p}{dt}$$

sustituimos lo calculado en la expresión del balance y nos queda

$$m_p \frac{dw_p}{dt} = -n_{w_{out}}^p * A_p$$

desarrollamos sabiendo que la masa del lecho de algas,  $m_p = \rho_p V_p$  y multiplicamos ambos miembros por  $\frac{1}{\rho_p V_p} \rightarrow$

$$\frac{dw_p}{dt} = -\frac{n_{w_{out}}^p * A_p}{\rho_p V_p}$$

en ésta ecuación, con el miembro de la derecha hacemos lo siguiente

$$\frac{n_{w_{out}}^p A_p}{\rho_p V_p} (*) = \frac{n_{w_{out}}^p}{\rho_p} a_p$$

\*si recordamos anteriormente la relación  $a_p = \frac{A_p}{V_p}$

entonces como hemos visto  $\frac{n_{w_{out}}^p A_p}{\rho_p V_p} = \frac{n_{w_{out}}^p}{\rho_p} a_p$ , y teniendo en cuenta que  $w_p = X^p$ :

$$\frac{dw_p}{dt} = \frac{dX^p}{dt} \rightarrow \rho_p \frac{dX^p}{dt} = -n_{w_{out}}^p a_p$$

Llegamos finalmente a despejar la variable deseada  $n_{w_{out}}^p$ :

$$n_{w_{out}}^p a_p = -\frac{dX^p}{dt} \rho_p \rightarrow \boxed{n_{w_{out}}^p = -\frac{\frac{dX^p}{dt} \rho_p}{a_p} = -\frac{\frac{dw_p}{dt} \rho_p}{a_p} (*)}$$

(\*)**CUIDADO** debemos tener en cuenta que para calcular  $X^p$  vamos a crear un parámetro adimensional:

$M \equiv \text{contenido en humedad normalizado} \approx \text{agua en el producto(alga)}$

$$M = \frac{X - X_{final}}{X_0 - X_{final}}$$

de tal forma que al empezar, en el instante inicial  $X = X_0$  y entonces

$$M = \frac{X_0 - X_{final}}{X_0 - X_{final}} = 1 \rightarrow M \text{ irá normalizado entre valores de 1 y 0}$$

## 2) Resolución de $w_a$

Al igual que en el apartado anterior, planteamos un **Balance de Masa**, pero ahora nos colocamos desde el punto de vista del aire, y realizamos el estudio del **contenido de agua en el aire que procede del colector solar**. Ésta variable nos va a decir cómo se humidifica el aire a lo largo del tiempo. La representación para éste esquema es la siguiente[45]:

si colocamos el punto de referencia en el aire, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- $w_a$ : contenido de agua en aire
- $A_p$  es el área del producto ( $m^2$ )
- $\dot{m}_a \equiv \text{flujo másico de aire } (\frac{kg}{s})$
- $m_a = \rho_a * V_a \equiv \text{masa aire (kg)}$
- $V_{control} \equiv V_c \rightarrow$
- $\rightarrow V_c = V_{producto} + V_a (m^3)$
- $V_a$  es el volumen de aire ( $m^3$ )

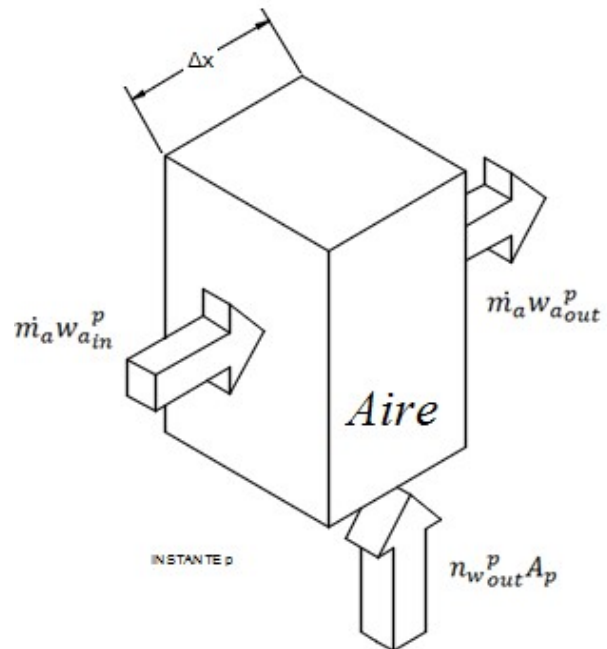


Figura 18. Detalle para el balance de masa en el aire

Por lo tanto, lo que le está llegando al volumen de aire:

$\dot{m}_a w_{a_{in}}^p$ : es lo que entra al sistema

$\dot{m}_a w_{a_{out}}^p$ : es lo que sale del sistema hacia el exterior

$n_w^p A_p$ : es lo que sale del lecho de algas al aire circulante, tal como se ha explicado en el apartado anterior.

en éste momento ya podemos plantear el balance de masa, que como antes, tendrá la siguiente expresión:

$$\frac{\sum dm_w}{dt} = \dot{m}_{entra} - \dot{m}_{sale}$$

\*no se tiene en cuenta el término de generación

como en éste caso estamos en el aire, el contenido en agua será  $m_w = m_a w_a$

podemos entonces desarrollar el término de la izquierda:

$$\frac{\sum dm_w}{dt} = \sum \frac{dm_a w_a}{dt} = m_a \frac{dw_a}{dt}$$

para los términos de la derecha, fijándonos en el esquema de arriba:

$$\dot{m}_{entra} = \dot{m}_a * w_{a_{in}}^p + n_w^p A_p$$

$$\dot{m}_{sale} = \dot{m}_a * w_{a_{out}}^p$$

si sustituimos el término de la izquierda y el de la derecha en la expresión del balance de masa planteado al comienzo de éste apartado obtendremos:

$$m_a \frac{dw_a}{dt} = \dot{m}_a w_{a_{in}}^p + n_w^p A_p - \dot{m}_a w_{a_{out}}^p$$

consideramos los diferenciales como incrementos y ayudándonos de las relaciones tales como

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} \rightarrow V_a = \varepsilon V_c \quad \varepsilon \equiv \text{espesor capa de algas}$$

lo aplicamos a la ecuación y queda:

$$\rho_a \varepsilon V_c \frac{w_{a_{out}}^p - w_{a_{out}}^{p-1}}{\Delta t} = \dot{m}_a (w_{a_{in}}^p - w_{a_{out}}^p) + n_{w_{out}}^p A_p$$

$$\rightarrow \text{multiplicamos por } \frac{1}{\rho_a \varepsilon V_c} \rightarrow$$

$$\frac{w_{a_{out}}^p - w_{a_{out}}^{p-1}}{\Delta t} = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon V_c} (w_{a_{in}}^p - w_{a_{out}}^p) + \frac{n_{w_{out}}^p A_p}{\rho_a \varepsilon V_c}$$

$\rightarrow$  donde el vol. control  $V_c = \text{altura} * \text{ancho} * \text{largo} = H * W * \Delta x = S * \Delta x$

$\text{largo} = \Delta x \equiv \text{largo de la bandeja del lecho de algas}$

$S = \text{superficie sección transversal túnel}$

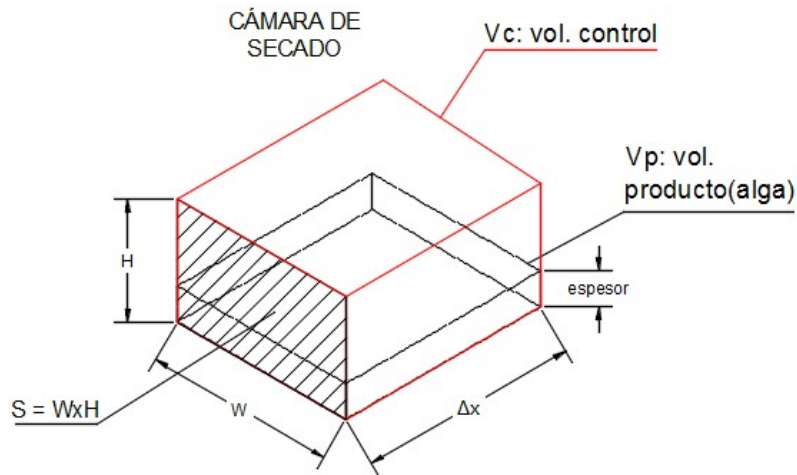


Figura 19. Detalle volumen de control aire y alga

si nos fijamos en la ecuación, en el 2º miembro del término de la derecha

$$\frac{n_{w_{out}}^p}{\rho_a} \frac{A_p}{\varepsilon * V_c} * \frac{V_p}{V_p} (*) = \frac{n_{w_{out}}^p}{\rho_a \varepsilon} * a_p (1 - \varepsilon)$$

(\*) relación entre  $V_{control}$  y  $V_{aire}$  :

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c}; \quad (1 - \varepsilon) = \frac{V_p}{V_c}; \quad a_p = \frac{A_p}{V_p}$$

aplicándolo a la ecuación llegamos a lo siguiente:



$$\frac{w_{a_{out}}^p - w_{a_{out}}^{p-1}}{\Delta t} = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon S} \frac{(w_{a_{in}}^p - w_{a_{out}}^p)}{\Delta x} + \frac{n_{w_{out}}^p}{\rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon)$$

expresamos los incrementos  $\Delta t$  y  $\Delta x$  en forma diferencial

$$\frac{dw_a}{dt} = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon S} \frac{dw_a}{dx} + \frac{n_{w_{out}}^p}{\rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon)$$

y de éste modo, despejamos la variable objetivo  $w_{a_n}^p$  :

$$w_{a_{out}}^p = \frac{\left( \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon S} w_{a_{in}}^p + \frac{\Delta t * n_{w_{out}}^p}{\rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon) + w_{a_{out}}^{p-1} \right)}{1 + \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon S}}$$

### 3) Resolución de $T_a$

Para el cálculo de las temperaturas del aire y de las algas necesitamos plantear el Balance General de Energía, en concreto para calcular  $T_a$  debemos aplicar el **balance de energía en el aire**, en el que se estudiará la cantidad de energía que se transfiere entre el aire que circula por encima del lecho de algas y las propias algas. La representación es la siguiente[45]:

como se ha explicado antes la expresión general del balance de energía en un sistema es la siguiente:

$$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{Q}_{entra} - \sum \dot{Q}_{sale}$$

donde  $\dot{Q}$  es la cantidad de energía transferiada en forma de calor.

en el esquema podemos ver lo siguiente:

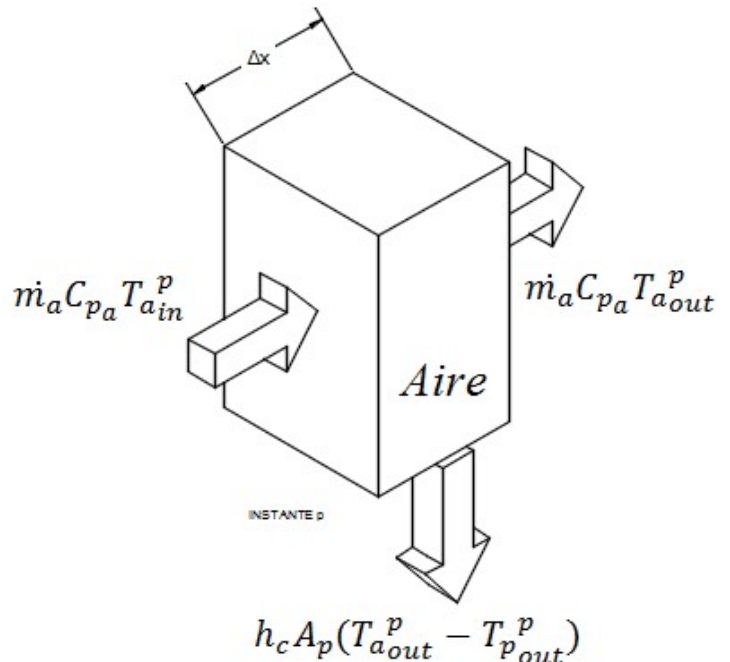


Figura 20. Detalle para el balance de energía en el aire

-entra al aire:  $\dot{m}_a C_{p_a} T_{a_{in}}^p$

-sale del aire, en el instante p:  $\dot{m}_a C_{p_a} T_{a_{out}}^p$  y  $h_c A_p (T_{a_{out}}^p - T_{p_{out}}^p)$  (\*)

(\*) donde  $h_c$  es el coeficiente de convección del aire se calcula gracias al número de Nusselt, explicado más adelante

por la izquierda de la expresión del balance tenemos

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_a C_{p_a} \frac{dT_a}{dt}$$

y por la derecha se trata de agrupar lo que entra al sistema y restarle lo que sale. si sustituimos ambos miembros en el Balance de Energía obtenemos la siguiente expresión:

$$\dot{m}_a C_{p_a} \frac{dT_a}{dt} = \dot{m}_a C_{p_a} T_{a_{in}}^p - (\dot{m}_a C_{p_a} T_{a_{out}}^p + h_c A_p (T_{a_{out}}^p - T_{p_{out}}^p))$$

como hemos hecho antes, expresamos los diferenciales como incrementos, por la izquierda:

$$\dot{m}_a C_{p_a} \frac{dT_a}{dt} = \dot{m}_a C_{p_a} \frac{T_{a_{out}}^p - T_{a_{out}}^{p-1}}{\Delta t}$$

y si multiplicamos todo por  $\frac{\Delta t}{\dot{m}_a C_{p_a}}$  para simplificar, tanto por la derecha como por la izquierda:

$$T_{a_{out}}^p - T_{a_{out}}^{p-1} = \frac{\Delta t}{\dot{m}_a} \dot{m}_a T_{a_{in}}^p - \frac{\Delta t}{\dot{m}_a C_{p_a}} (\dot{m}_a C_{p_a} T_{a_{out}}^p + h_c A_p (T_{a_{out}}^p - T_{p_{out}}^p))$$

pasamos todo a la derecha salvo el término que queremos calcular, el  $T_{a_{out}}^p$  y operamos:

$$T_{a_{out}}^p = T_{a_{out}}^{p-1} + \frac{\Delta t}{\dot{m}_a} \dot{m}_a T_{a_{in}}^p - \frac{\Delta t}{\dot{m}_a} \dot{m}_a T_{a_{out}}^p - \frac{\Delta t}{\dot{m}_a C_{p_a}} h_c A_p T_{a_{out}}^p + \frac{\Delta t}{\dot{m}_a C_{p_a}} h_c A_p T_{p_{out}}^p$$

si nos fijamos en el 4º sumando del miembro de la derecha:

$$-\frac{\Delta t}{\dot{m}_a C_{p_a}} h_c A_p T_{a_{out}}^p = -\frac{\Delta t}{\rho_a \varepsilon V_c C_{p_a}} h_c A_p T_{a_{out}}^p = -\frac{\Delta t}{C_{p_a}} * \frac{h_c A_p}{\rho_a \varepsilon V_c} * \frac{V_p}{V_p} * T_{p_{out}}^p$$

y entonces simplificando gracias a las relaciones ya conocidas:

$$\frac{h_c A_p}{\rho_a \varepsilon V_c} * \frac{V_p}{V_p} = \frac{h_c}{\rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon)$$

así, el 4º sumando quedaría

$$-\frac{\Delta t}{C_{pa}} \frac{h_c}{\rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon) T_{a_{out}}^p$$

aplicamos lo mismo al 5º sumando del miembro de la derecha y queda:

$$+\frac{\Delta t}{m_a C_{pa}} h_c A_p T_{p_{out}}^p = +\frac{\Delta t}{C_{pa}} \frac{h_c}{\rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon) T_{p_{out}}^p$$

Volviendo a la expresión original, pasamos todos los sumandos multiplicados por  $T_{a_{out}}^p$  a la izquierda y sacamos factor común  $T_{a_{out}}^p$ :

$$\begin{aligned} T_{a_{out}}^p \left( \frac{\Delta t}{m_a} \dot{m}_a + \frac{\Delta t}{C_{pa}} \frac{h_c}{\rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon) + 1 \right) &= \\ &= T_{a_{out}}^{p-1} + \frac{\Delta t}{m_a} \dot{m}_a T_{a_{in}}^p + \frac{\Delta t}{C_{pa}} \frac{h_c}{\rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon) T_{p_{out}}^p \end{aligned}$$

multiplicamos toda la expresión por  $\frac{1}{\Delta t}$ :

$$T_{a_{out}}^p \left( \frac{\dot{m}_a}{m_a} + \frac{h_c}{C_{pa} \rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon) + \frac{1}{\Delta t} \right) = \frac{T_{a_{out}}^{p-1}}{\Delta t} + \frac{\dot{m}_a}{m_a} T_{a_{in}}^p + \frac{h_c}{C_{pa} \rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon) T_{p_{out}}^p$$

despejamos la variable objetivo  $T_{a_n}^p$ :

$$T_{a_{out}}^p = \frac{\frac{T_{a_{out}}^{p-1}}{\Delta t} + \frac{\dot{m}_a}{\rho_a V_a} T_{a_{in}}^p + \frac{h_c}{C_{pa} \rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon) T_{p_{out}}^p}{\frac{\dot{m}_a}{\rho_a V_a} + \frac{h_c}{C_{pa} \rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon) + \frac{1}{\Delta t}}$$

#### 4) Resolución de $T_p$

Para ver cómo se comporta la Temperatura en el producto, en el lecho de alga, empezaremos planteando un **Balance de energía en la capa de microalgas**, donde en el esquema siguiente podemos ver de qué forma se transfiere energía entre el sistema de algas y el aire que circula alrededor[45]:

A diferencia del *BM*, con la energía sí debemos considerar que existe intercambio de calor entre ambos sistemas (alga-aire), de la forma que vemos representada:

Balance general de energía:

$$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{Q}_{entra} - \sum \dot{Q}_{sale}$$

Repetimos el mismo proceso que para los casos anteriores, desarrollamos el término de la izquierda

$$\frac{dE}{dt} = m_p C_{pp} \frac{dT_p}{dt}$$

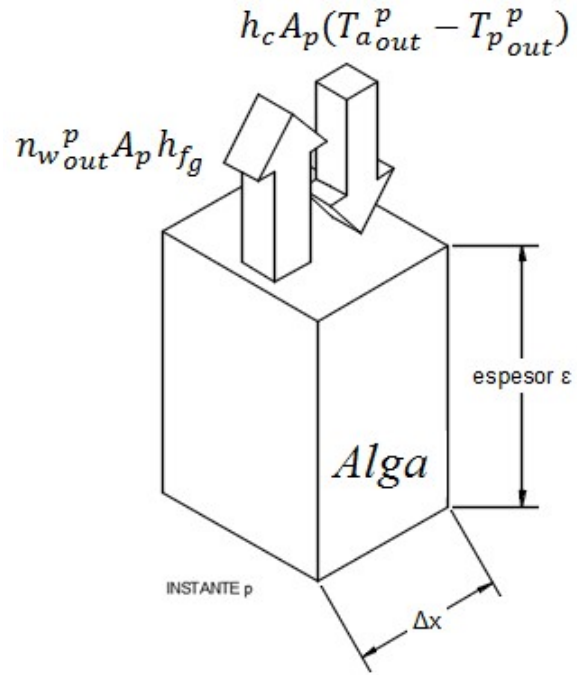


Figura 21. Detalle para el balance de energía en el alga

sustituimos los diferenciales de la ecuación por incrementos:

$$m_p C_{pp} \frac{dT_p}{dt} = m_p C_{pp} \frac{T_{p_{out}}^p - T_{p_{out}}^{p-1}}{\Delta t}$$

si se desarrolla el término de la derecha, donde:

-entra al sistema, procedente del Aire:  $h_c A_p (T_{a_{out}}^p - T_{p_{out}}^p)$

-sale del sistema (producto), dirección el Aire:  $n_{w_{out}}^p A_p h_{fg} (*)$

$(*)h_{fg} \equiv$  entalpía de vaporización del aire

sustituimos lo calculado en el balance original y tenemos:

$$m_p C_{pp} \frac{T_{p_{out}}^p - T_{p_{out}}^{p-1}}{\Delta t} = h_c A_p (T_{a_{out}}^p - T_{p_{out}}^p) - n_{w_{out}}^p A_p h_{fg}$$

multiplicamos todo por  $\frac{\Delta t}{m_p C_{pp}} \rightarrow$

$$T_{p_{out}}^p - T_{p_{out}}^{p-1} = \frac{h_c A_p T_{a_{out}}^p \Delta t}{m_p C_{pp}} - \frac{h_c A_p T_{p_{out}}^p \Delta t}{m_p C_{pp}} - \frac{n_{w_{out}}^p A_p h_{fg} \Delta t}{m_p C_{pp}}$$

agrupamos y sacamos factor común como se ha hecho antes:

$$T_{p_{out}}^p \left( 1 + \frac{h_c A_p \Delta t}{m_p C_{pp}} \right) = \frac{h_c A_p T_{a_{out}}^p \Delta t}{m_p C_{pp}} - \frac{n_{w_{out}}^p A_p h_{fg} \Delta t}{m_p C_{pp}} + T_{p_{out}}^{p-1}$$

multiplicamos todo por  $\frac{1}{\Delta t}$ :

$$T_{p_{out}}^p \left( \frac{1}{\Delta t} + \frac{h_c A_p}{m_p C_{pp}} \right) = \frac{h_c A_p T_{a_{out}}^p}{m_p C_{pp}} - \frac{n_{w_{out}}^p A_p h_{fg}}{m_p C_{pp}} + \frac{T_{p_{out}}^{p-1}}{\Delta t}$$

sustituimos  $m_p = \rho_p * V_p$

$$T_{p_{out}}^p \left( \frac{1}{\Delta t} + \frac{h_c A_p}{\rho_p V_p C_{pp}} \right) = \frac{h_c A_p T_{a_{out}}^p}{\rho_p V_p C_{pp}} - \frac{n_{w_{out}}^p A_p h_{fg}}{\rho_p V_p C_{pp}} + \frac{T_{p_{out}}^{p-1}}{\Delta t}$$

si recordamos las relaciones entre volúmenes y áreas como se hizo antes, las relaciones eran

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c}; \quad (1 - \varepsilon) = \frac{V_p}{V_c}; \quad a_p = \frac{A_p}{V_p}$$

si las aplicamos a los distintos sumandos de la expresión:

$$\frac{h_c A_p}{\rho_p V_p C_{pp}} = \frac{h_c a_p}{\rho_p C_{pp}};$$

$$\frac{n_{w_{out}}^p A_p h_{fg}}{\rho_p V_p C_{pp}} = \frac{n_{w_{out}}^p a_p h_{fg}}{\rho_p C_{pp}};$$

$$\frac{h_c A_p T_{a_{out}}^p}{\rho_p V_p C_{pp}} = \frac{h_c a_p T_{a_{out}}^p}{\rho_p C_{pp}};$$

finalmente despejamos la variable que buscábamos,  $T_{p_{out}}^p$ :

$$T_{p_{out}}^p = \frac{\frac{h_c a_p T_{a_{out}}^p}{\rho_p C_{p_p}} - \frac{n_{w_{out}}^p a_p h_{fg}}{\rho_p C_{p_p}} + \frac{T_{p_{out}}^{p-1}}{\Delta t}}{\frac{1}{\Delta t} + \frac{h_c a_p}{\rho_p C_{p_p}}}$$

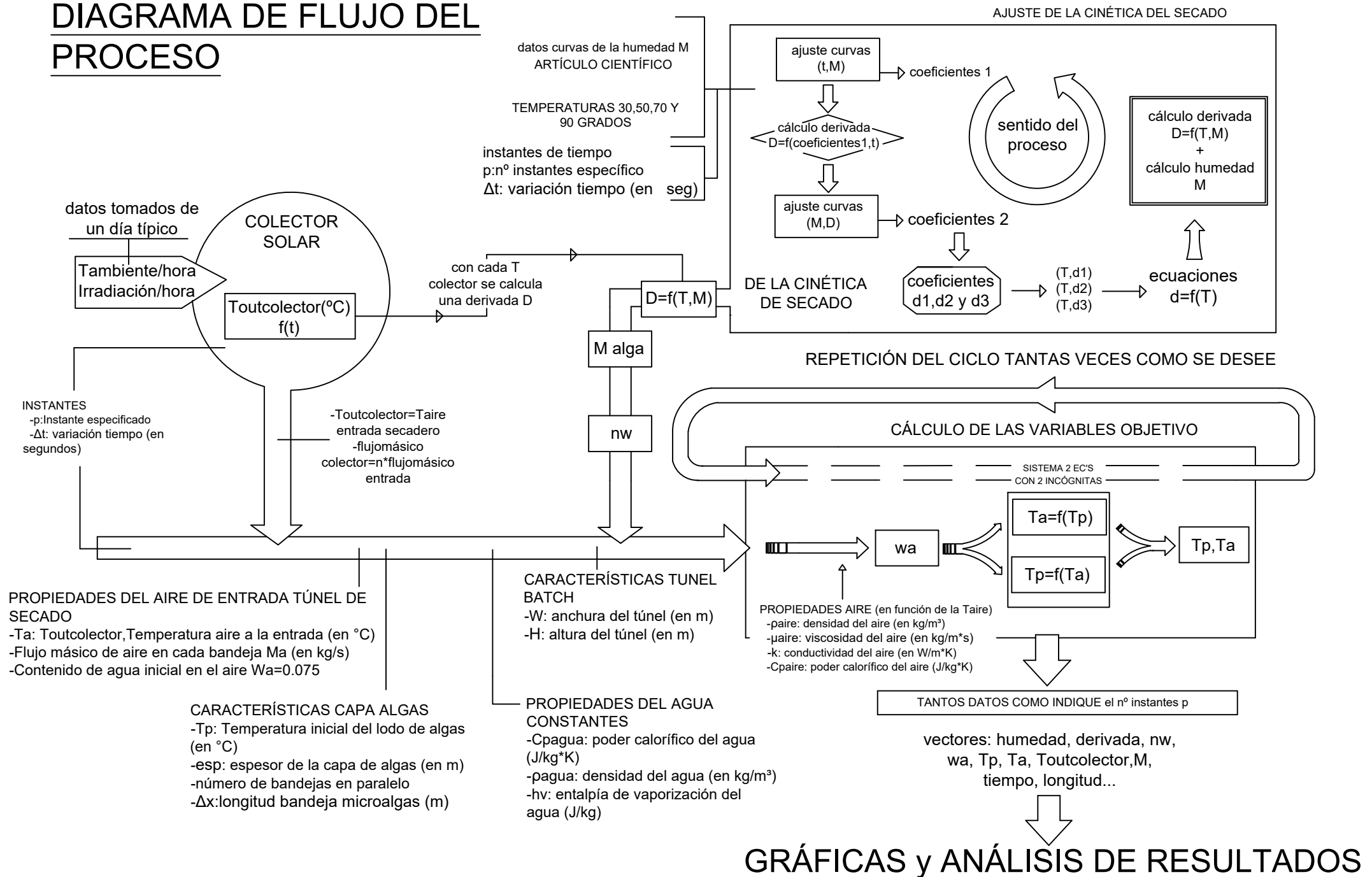
### 3.2.2 Diagrama de flujo

Un diagrama de flujo permite identificar un proceso que se va a realizar, con él podemos seguir lo que ocurre en el proceso paso a paso. El diagrama de flujo está formado por ‘cajas’, ‘flechas’, ‘acciones’, y otros símbolos que indican el tipo de acción a realizar en un paso en concreto (trabajo, reposo, espera, subir, bajar...).

En éste caso, el proceso a seguir para obtener los resultados en cada instante de tiempo de las ecuaciones anteriormente resueltas será el siguiente:

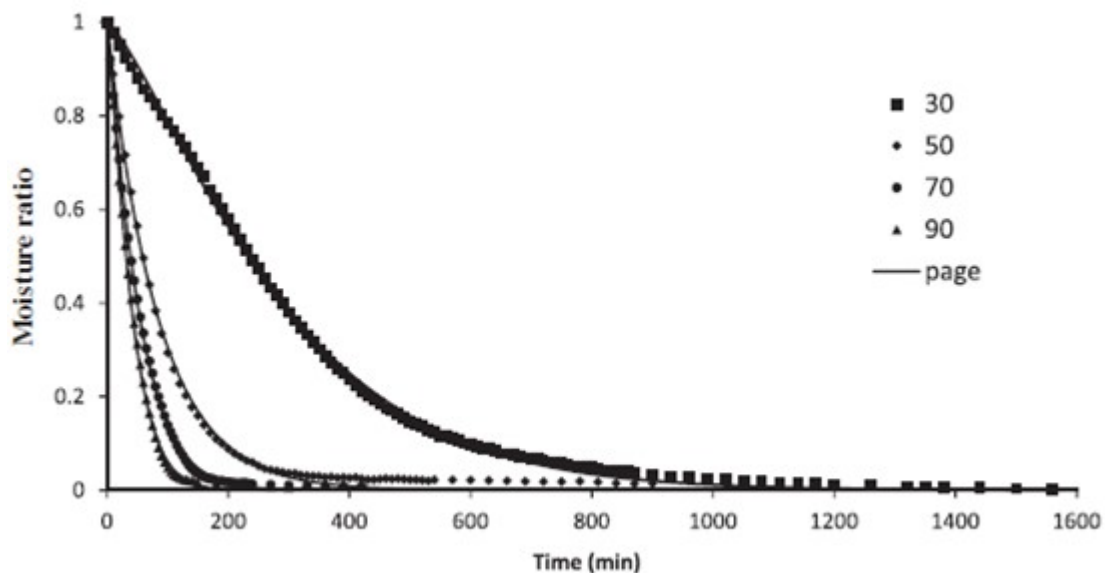
*Figura 22. Diagrama de Flujo del proceso*

# DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO



### 3.3 La cinética del secado

Para la realización de éste proyecto fue necesario estudiar la cinética del secado de un lecho de microalgas. Para ello se necesitaba partir algún dato experimental que se pudiera usar en el proyecto. Los datos se consiguieron de un artículo científico publicado por la revista *Bioresource Technology*, la cual se consultó desde la plataforma online *Sciencedirect*. En el artículo, investigadores de las universidades de Estados Unidos e India muestran el estudio realizado acerca de los efectos que causan los métodos de ruptura de células en las características de secado y composición en lípidos de las algas verdes. En uno de los experimentos realizados, se registraron los datos de la relación de humedades (ratios) con el tiempo de una mezcla de microalgas (3 especies de algas verdes: *Chlorella minutissima*, *Chlamydomonas globosa*, y *Scenedesmus bijuga*) para 4 temperaturas constantes (30 °C, 50°C, 70°C y 90°C). Dichos datos se representaron y son los que se han tomado como punto de partida para establecer un modelo de la cinética de secado de microalgas:



Gráfica 1. Relación experimental de humedades con el tiempo a temperaturas de 30, 50, 70 y 90°C [39]

Lo que vamos a hacer con éstos datos es lo siguiente: con las humedades registradas para 4 temperaturas que abarcan un intervalo de los 30 a los 90°C, vamos a crear un modelo matemático que permita calcular éstas humedades para una T variable en el tiempo, y todo esto durante un tiempo t finito que especificaremos nosotros. Si nosotros derivamos la variación de la humedades M con el tiempo t, conseguiremos tener la velocidad con la que la humedad se reduce, o lo que es lo mismo, la velocidad de secado (que dependerá de la M y del tiempo t). Gracias a los ajustes polinómicos que realizaremos sobre las curvas que vamos a ir obteniendo al representar los datos, podremos obtener los coeficientes que intervienen en la ecuación de las derivadas en función de la T. Una vez saquemos la dependencia de dichos coeficientes en la T, tendremos la dependencia de las derivadas (velocidades de secado) en función de la temperatura de secado.



El objetivo que se busca con el estudio de la cinética del secado de éstas microalgas es conocer la variación de la humedad del alga con el tiempo, para ello crearemos una simulación con un modelo numérico que nos permita estudiar el comportamiento del proceso de secado de una microalga, y ver cómo se reduce la humedad de las microalgas a lo largo del tiempo, dependiendo de la temperatura del aire de secado que circula en contacto directo con el lecho de algas.

Para conseguir trasladar el mayor número de puntos analíticamente desde las gráficas anteriores al programa informático, generaremos los vectores de la curva de secado de cada temperatura. Para ello usaremos la función `digitize2.m` propia de MATLAB®, ésta función lee gráficas en formato `.JPG` de tal forma que se pueden ‘sacar’ los datos de las curvas haciendo clic con el puntero del ratón encima de la gráfica, lo que generará tantos puntos como queramos. Éste proceso se realizará para todas las temperaturas ( 30,50,70 y 90 °C).

Se han tomado 30 puntos de cada curva con el fin de generar unos datos lo más exactos posibles a la realidad. Una vez terminado éste paso, tendremos 4 ficheros de datos llamados `digitizecurva30.dat`, `digitizecurva50.dat`...(uno para cada temperatura). Éstos ficheros contienen una columna de datos correspondientes a los tiempos  $t$  y otra columna que corresponde a las humedades  $MR$ .

Con los comandos de MATLAB®:

```
>> t'='digitizecurva'(1:end,1)
>> MR'='digitizecurva'(1:end,2)
```

generaremos los vectores  $t'$  '(tiempo) y  $MR'$  '(humedad) para cada temperatura, donde el espacio ' ' indica el lugar donde va especificada la temperatura correspondiente y los números 1 y 2 indican qué columna de datos estamos extrayendo.

como hemos tomado los valores de la gráfica del artículo y en ella vienen los tiempos en minutos y las temperaturas en grados centígrados, pasaremos los tiempos a segundos multiplicando los vectores obtenidos por 60, de la siguiente forma:

```
>> t30=t30*60;
>> t50=t50*60;
>> t70=t70*60;
>> t90=t90*60;
```

Como podemos ver en una captura de pantalla de MATLAB®, nos saldrán 4 parejas de vectores, parejas de tiempo ( $t_{30}, t_{50}, \dots$ ) y de humedades ( $MR_{30}, MR_{50}, \dots$ ), cada una de ellas corresponde a una temperatura.

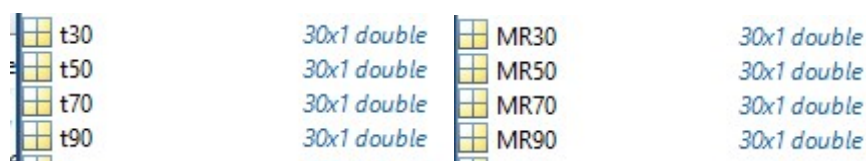


Figura 23. Parejas de tiempos y humedades generadas en MATLAB®

```
>> format long
>> t30

t30 =

    1.0e+04 *

    0.0477951600000000
    0.1433856000000000
    0.2270268000000000
    0.3345660000000000
    0.4301562000000000
    0.5615934000000000
```

Figura 24. Detalle MATLAB® tiempos para 30 grados centígrados, en segundos

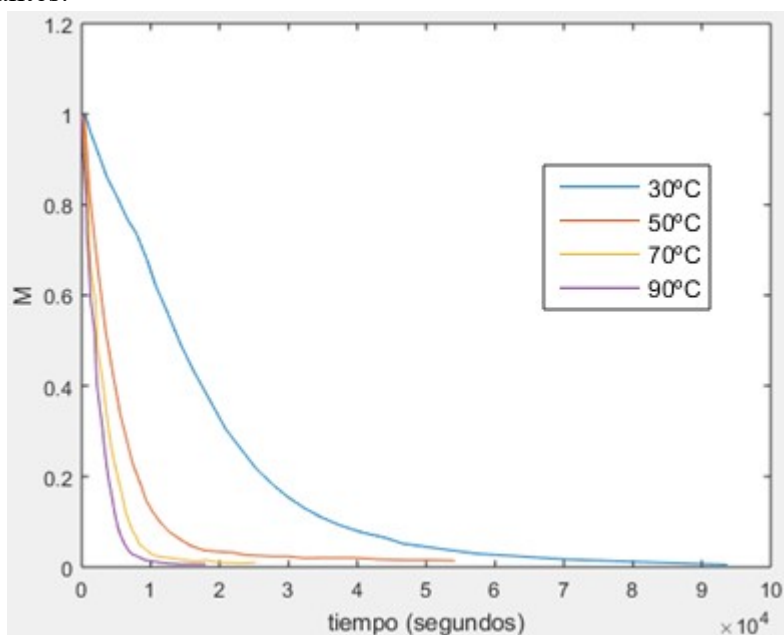
De ésta forma podemos representar alguna curva para comprobar que lo que representa es coherente con los datos tomados del artículo, mediante el siguiente comando:

>> **plot(t' 'MR' ')** donde en ' ' metemos la temperatura que queramos.

Podemos mostrar varias gráficas en una misma figura, con los siguientes comandos,

```
>> plot(t30,MR30)
>> hold on
>> plot(t50,MR50)
>> hold on
>> plot(t70,MR70)
>> hold on
>> plot(t90,MR90)
```

Obtenemos las gráficas para 30, 50, 70 y 90 grados, que coinciden con las publicadas por el artículo de antes:



Gráfica 2. Variación de las humedades vs tiempo para 30, 50, 70 y 90°C

## AJUSTE DE LAS CURVAS $M$ y $t$ OBTENIDAS

### OPCIÓN 1)

Una vez representada la curva, si queremos ajustar la curva a un modelo matemático, damos en la pestaña de herramientas de la propia ventana de gráfica, **tool – basic fitting**:

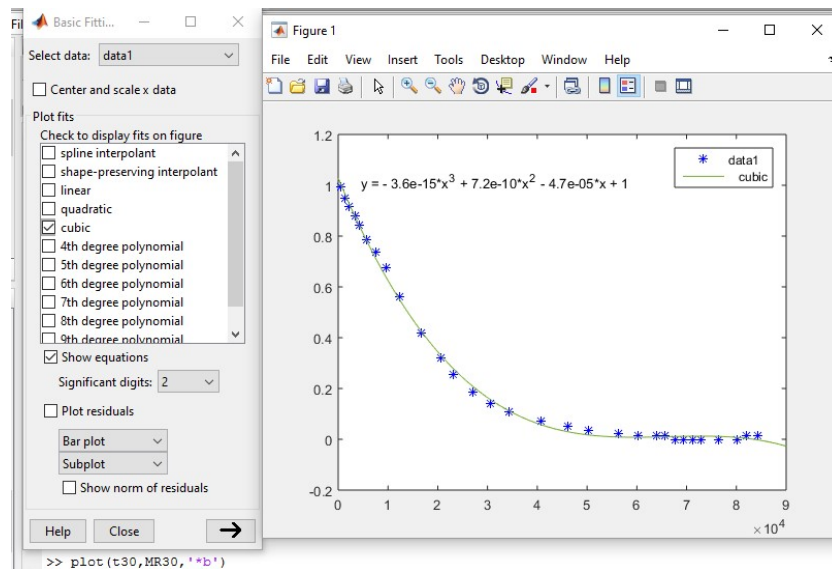


Figura 25. MATLAB®-Ventana de ajuste de una gráfica

En ésta ventana tenemos varias opciones, entre otras, elegir el ajuste que queramos y mostrar su ecuación y gráfica que lo define, para ver si se asemeja todo lo posible a nuestra curva. En éste caso vemos que un ajuste cúbico (ecuación polinómica de tercer grado) es una buena elección.

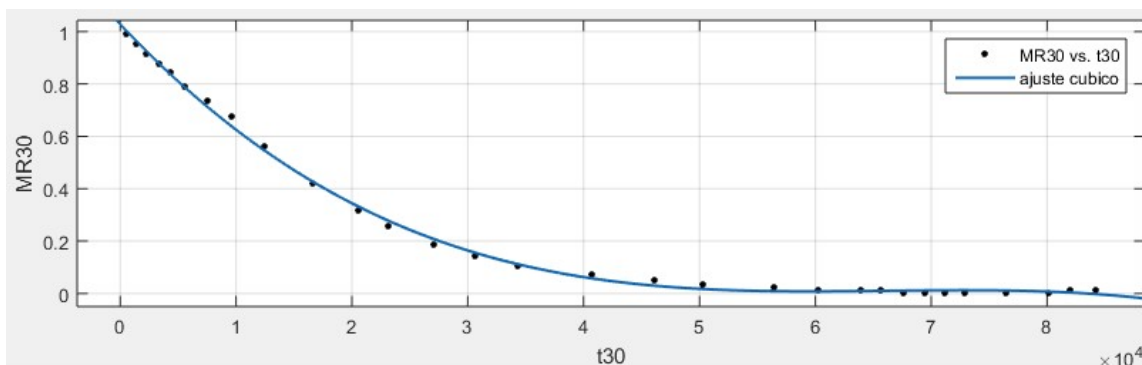
### OPCIÓN 2)

Directamente en la ventana de comandos, sin coger datos, escribimos el comando

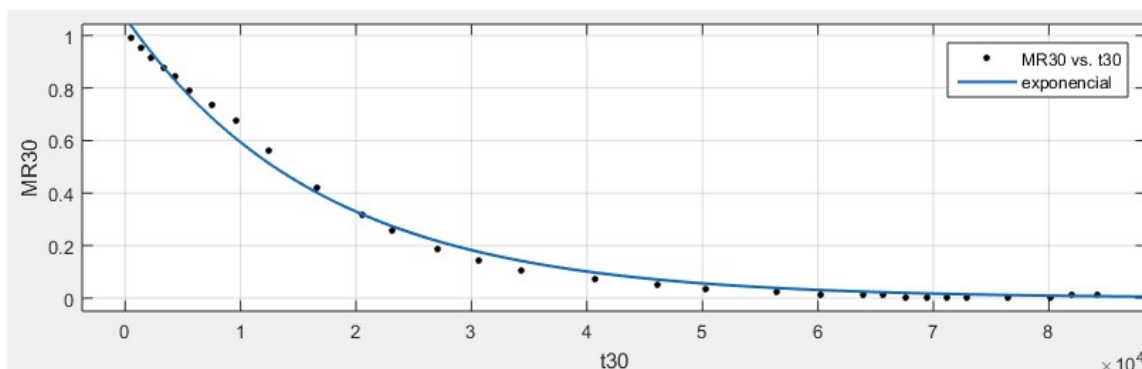
**>>cftool**

y nos aparece una ventana con más opciones que la anterior, en la que elegimos los datos a representar (ejes x e y) y la curva a la que queremos ajustar, pudiendo especificar el grado, autoajuste, centrado, etc.

En una ventana más pequeña se nos muestran los resultados y la ecuación del ajuste junto con los test de ajuste R-cuadrado, SSE...**escogeremos la opción 2 para llevar a cabo el resto de ajustes.**



Gráfica 3. Humedad 30°C vs tiempo 30°C con ajuste polinómico de grado 3 (CUBICO).



Gráfica 4. Humedad 30°C vs tiempo 30°C con ajuste EXPONENCIAL

Con el ajuste que me propone MATLAB®, comprobamos que hay dos funciones que se ajustan bastante bien a nuestras curvas, **son las polinómica cúbica y la exponencial**.

Si nos centramos únicamente en el intervalo que nos interesa, entre 0 y 1 del eje de ordenadas Y, **podríamos elegir una u otra función para llevar a cabo la modelización**. Nosotros vamos a elegir **la función polinómica de grado 3 o cúbica**, aunque podríamos hacerlo también con la exponencial sin ningún problema.

La expresión general de un polinomio cúbico o de tercer grado es

$$y = A1x^3 + A2x^2 + A3x + A4$$

donde  $A1$ ,  $A2$ ,  $A3$  y  $A4$  son los parámetros ó coeficientes del polinomio. Para una distribución dada, será necesario determinar el valor de dichos parámetros. El cálculo de dichos coeficientes se explica a continuación:

con el comando *polyfit*

Para el ajuste de datos a un polinomio se utiliza la función de MATLAB® *polyfit*, cuya sintaxis es la siguiente:

$$p=polyfit(x,y,n)$$

- $x$  e  $y$  son los vectores de las abscisas y de las ordenadas de los datos, respectivamente, en nuestro caso serán (tiempos,humedades)
- $n$ , es el grado del polinomio al que se quieren ajustar los datos, en nuestro caso 3
- $p$ , es el vector que contendrá de los coeficientes de dicho polinomio.

en nuestro caso el comando será el siguiente:

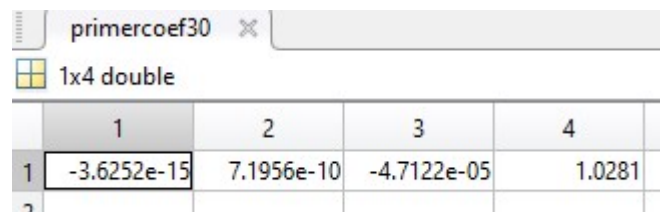
```
>>primercoef30 = polyfit(t30,MR30,3)
```

obtenemos lo siguiente

```
primercoef30 =
    -0.0000000000000004    0.000000000719561   -0.000047121773815    1.028072783124091

>> primercoef50

primercoef50 =
    -0.0000000000000027    0.000000002845341   -0.000090476184901    0.846268572911030
```



primercoef30

1x4 double

	1	2	3	4
1	-3.6252e-15	7.1956e-10	-4.7122e-05	1.0281

Figura 26. 1º Coeficientes Humedad30 vs tiempo30

Nos aparecen los parámetros A1, A2 ,A3 y A4.

si hacemos lo mismo para el resto de temperaturas, generamos 4 vectores que contienen los 4 coeficientes para las temperaturas de 30,50,70 y 90 grados centígrados:

primercoef30	[-3.6252e-15 7.1956e-10 -4.7122e-05 1.0281]
primercoef50	[-2.6748e-14 2.8453e-09 -9.0476e-05 0.8463]
primercoef70	[-1.5707e-13 9.6255e-09 -1.7738e-04 0.9496]
primercoef90	[-4.5294e-13 1.9616e-08 -2.5491e-04 0.9604]

Figura 27. 1º Coeficientes para 30, 50, 70 y 90°C

## CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE SECADO, LA DERIVADA DE MR

Una vez tenemos calculados y almacenados en vectores los coeficientes de los polinomios anteriores, pasamos a calcular la velocidad de secado, es decir, la derivada (variación de la humedad  $M$  con el tiempo  $t$ ). En cada instante, si conocemos la velocidad de secado (derivada) a la temperatura que estemos (como se explica al comienzo del apartado hemos calculado las expresiones que dan la dependencia de  $D=f(T)$ ), y sabiendo la humedad a la que estamos (pues empezamos dando un valor inicial de  $M$ ), podremos conocer la humedad transcurrido un intervalo de tiempo  $\Delta t$ .

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M^{p+1} - M^p}{\Delta t}$$

Como hemos visto en los pasos anteriores, las humedades se ajustaban a una función polinómica cúbica, por lo que si derivamos dicho polinomio, obtendremos la expresión de la derivada.

En cada instante de tiempo calculamos las derivadas de la función cúbica, una para cada temperatura, cuya expresión sería, por ejemplo para 30 grados

$$D30 = \frac{dhum_{30}}{dtime_{30}} = 3A1t30^2 + 2A2t30 + A3$$

donde  $A1$ ,  $A2$  y  $A3$  son los mismos coeficientes que los calculados antes, excepto el coeficiente  $A4$  que por tratarse de la derivada, desaparece al ser constante. El cálculo de dichos coeficientes se realiza igual que cuando se calcularon para el ajuste de la humedad en función del tiempo

Por comodidad y para generar gran cantidad de datos de forma repetida, hemos creado una función que genera la derivada  $D'$  ' gracias a un proceso de bucle repetitivo en función de la cantidad de puntos tomados, de los coeficientes y de los tiempos.

Mediante la función **derivada.m** creada con el editor de funciones de MATLAB®, podemos generar un vector con el valor de las derivadas, que lo llamaremos deriv30, 50, etc.

### *código de la función derivada.m*

```
function D=derivada(coeficientes,t)
%tenemos que calcular la derivada de todas las parejas de datos
D=zeros(30,1);
%rellenamos el vector con las derivadas de cada pareja de datos
for i=1:30

D(i)=3*(coeficientes(1)*(t(i)^2))+(2*coeficientes(2)*t(i))+coeficientes(
3);
end
end
```

para llamar a ésta función y obtener la derivada, usaremos el siguiente comando

>> D' '=derivada(primercoef' 't' '); como se muestra en la captura de pantalla

```
>> D30

D30 =

    1.0e-04 *

-0.464364279447837
-0.450806406993058
-0.439106365848701
-0.424286976536339
-0.411325384244994
-0.393827625187682
-0.369047477573275
-0.343589295244800
-0.309176430684445
```

Figura 28. Derivada para 30°C

cada derivada será un vector con 30 valores, correspondientes a los 30 valores de tiempo que teníamos, que corresponden a su vez a los 30 puntos que tomé para leer las gráficas iniciales. Así, generamos las derivadas del resto de T (30,50,70 y 90 grados):

D30	30x1 double
D50	30x1 double
D70	30x1 double
D90	30x1 double

Figura 29. Derivadas para 30, 50, 70 y 90°C

## AJUSTE DE LAS DERIVADAS

Volvemos a repetir el procedimiento de ajuste realizado anteriormente con las curvas de humedad M y tiempo t, pero teniendo cuidado pues ahora los ejes de x e y han cambiado y no valen lo mismo, pues ahora se calcula la velocidad de secado (derivada) con los coeficientes procedentes del ajuste de la humedad con el tiempo. Por ejemplo para 30 grados:

- x: es el valor de la antigua MR30 (humedad)
- y : es el valor de la derivada D30 que ya se ha calculado

Como antes, en la ventana de comandos escribimos el siguiente comando:

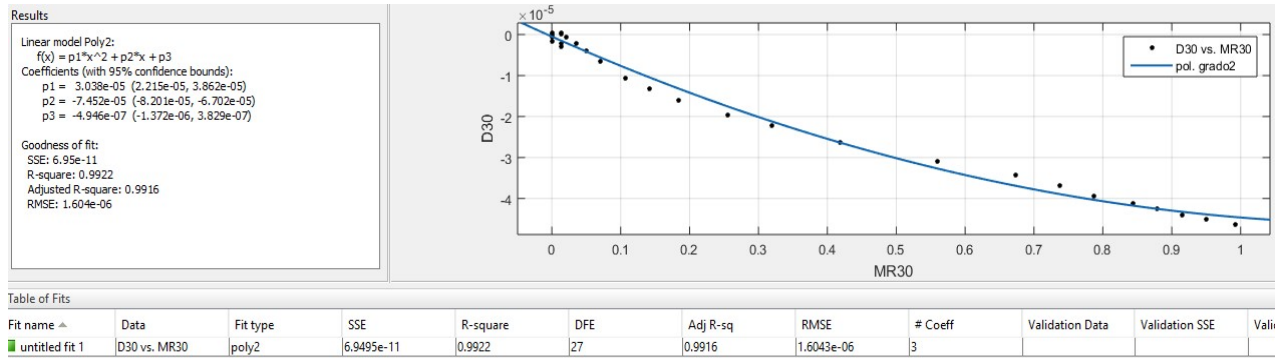
>>cftool

en la ventana que aparece metemos los ejes x (humedades MR) e y (derivadas D) correspondientes a cada T y ajustamos las curvas que nos salen a una función del tipo



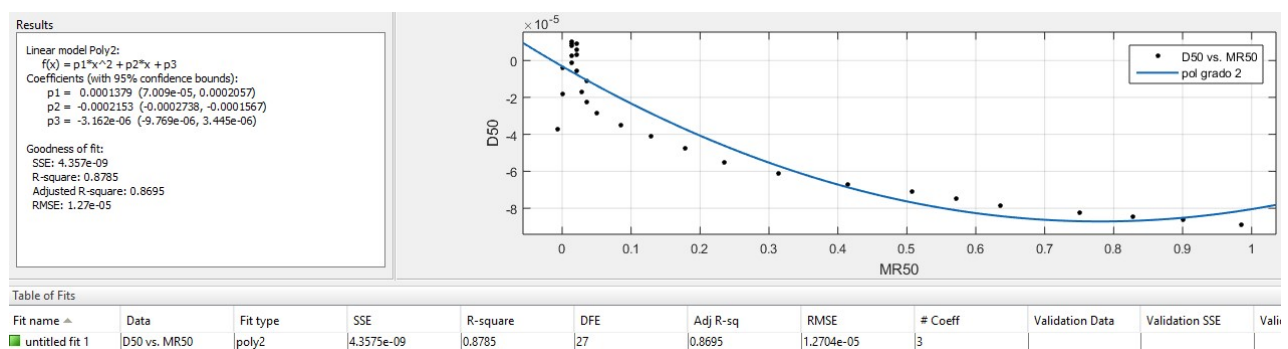
polinómica cuadrada, de grado 2, pues la curva de la función polinómica se ajusta bien a nuestros datos. Repetimos el proceso para todas y cada una de las temperaturas:

para **30 grados**:



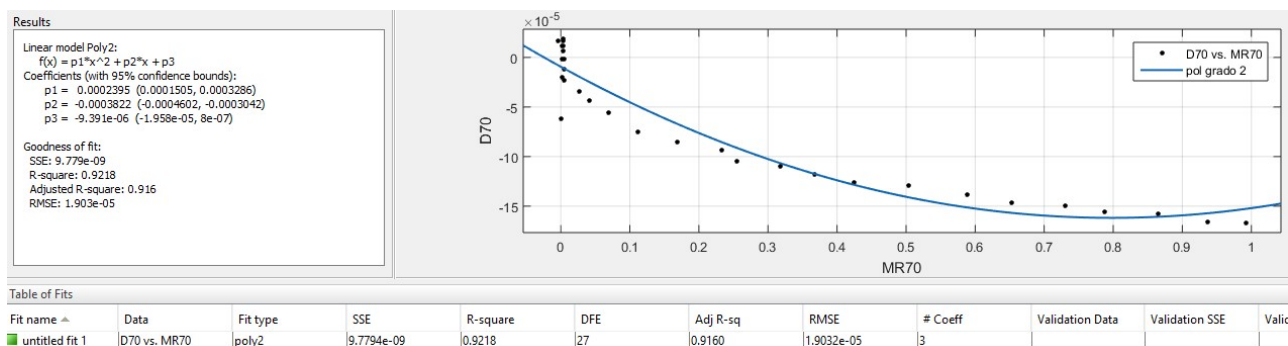
Gráfica 5. Ajuste con polinomio grado 2 para 30 °C

para **50 grados**:



Gráfica 6. Ajuste con polinomio grado 2 para 50 °C

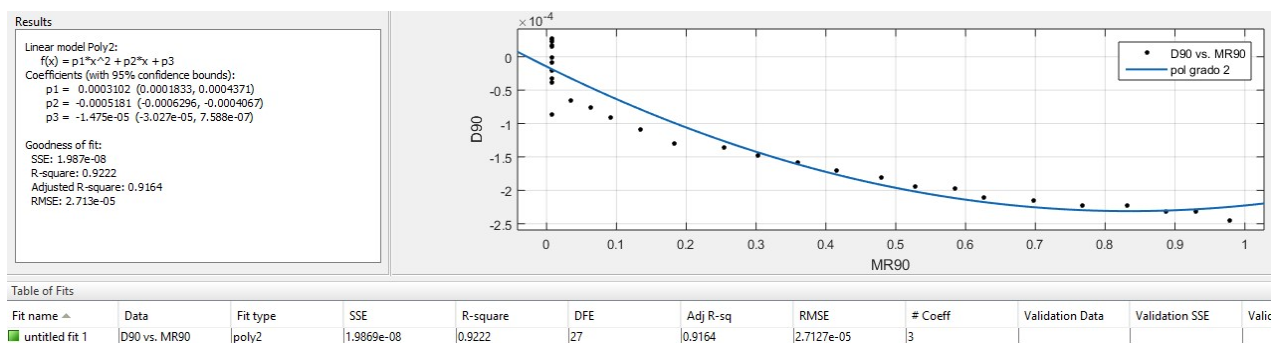
para **70 grados**:



Gráfica 7. Ajuste con polinomio grado 2 para 70 °C



para 90 grados:



Gráfica 8. Ajuste con polinomio grado 2 para 90 °C

Podemos dar por correcto el ajuste de las anteriores curvas a un polinomio de grado 2, de ésta forma las derivadas se expresarían como ecuaciones polinómicas del grado igual al de la función ajustada, es decir 2. De ésta manera, para cada temperatura:

$$D_{30} = d_{301}M_{30}^2 + d_{302}M_{30} + d_{303} \quad \text{donde } M = MR$$

Generamos 4 vectores (uno para cada temperatura) que tendrán los 3 coeficientes de la ecuación de la derivada, (d301,d302,d303...).

Para ello utilizamos de nuevo el comando *polyfit*, como se hizo anteriormente, y lo aplicamos a las distintas temperaturas, así recopilamos los nuevos coeficientes en 4 vectores

`>> secondcoefderiv' 'polyfit(MR' 'D' '2)`

el número 2 indica el grado del polinomio al que se quieren ajustar los datos. Para 30 grados por ejemplo:

`>> secondcoefderiv30=polyfit(MR30,D30,2)`

```
>> secondcoefderiv30

secondcoefderiv30 =

    1.0e-04 *

    0.303817446469405   -0.745177647589267   -0.004945961848765
```

Figura 30. 2º Coeficientes Humedad30 vs derivada30

para el resto de temperaturas, se calculan los coeficientes correspondientes (el proceso que se ha llevado hasta ahora es el mismo para las 4 temperaturas):

secondcoefderiv30	[3.0382e-05 -7.4518e-05 -4.9460e-07]
secondcoefderiv50	[1.3791e-04 -2.1526e-04 -3.1622e-06]
secondcoefderiv70	[2.3955e-04 -3.8219e-04 -9.3912e-06]
secondcoefderiv90	[3.1019e-04 -5.1815e-04 -1.4754e-05]

Figura 31. Vectores con los coeficientes del 2º ajuste, para las 4 temperaturas

Una vez tenemos todos estos datos generados y guardados, nos disponemos a representar los coeficientes en función de las temperaturas, es decir:

Generamos un vector de temperaturas, en grados Kelvin (K), con las cuatro T's protagonistas, 30, 50, 70 y 90 grados centígrados:

```
>>T=[303 323 343 363]
```

Ahora agrupamos los coeficientes calculados anteriormente en el ajuste de la derivada con la humedad en 3 grupos principales, basándose tal agrupación en si son coeficientes del primer, segundo o tercer término de la ecuación de cada T, es decir, los coeficientes del primer término de la ecuación de 30°C, 50°C, 70°C y 90°C formarán un vector d1, los del segundo término un vector d2 y así sucesivamente, para ello usamos los siguientes comandos:

```
>>d1=[secondcoefderiv30(1) secondcoefderiv50(1) secondcoefderiv70(1)
secondcoefderiv90(1)]
```

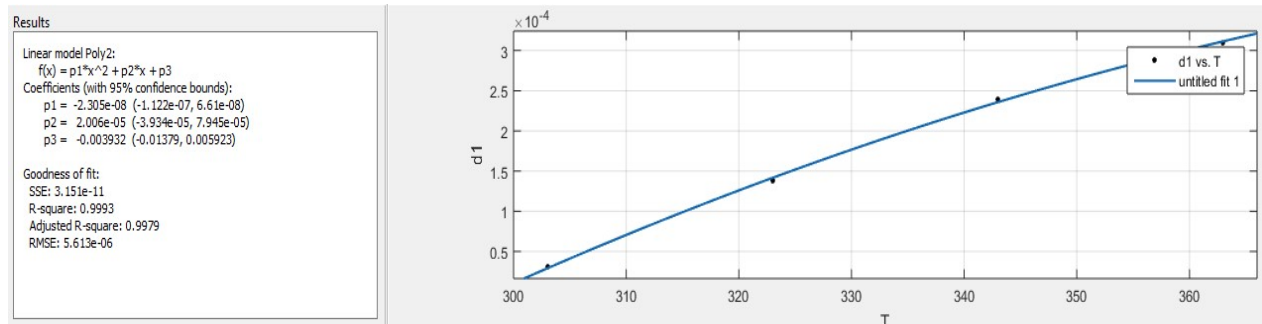
y así con el resto, de tal forma que salen:

```
>> d1
d1 =
    1.0e-03 *
    0.030381744646941    0.137910259314177    0.239546504858879    0.310188383083663
>> d2
d2 =
    1.0e-03 *
   -0.074517764758927   -0.215259484010698   -0.382187228690653   -0.518149692905135
>> d3
d3 =
    1.0e-04 *
   -0.004945961848765   -0.031622310232310   -0.093911880348555   -0.147544305834128
```

Figura 32. Vectores con los 3 coeficientes d1,d2 y d3

En éste momento, ya podemos representar los coeficientes con respecto a la temperatura, de tal forma que podamos calcular su valor en función de la T que queramos establecer, ¿cómo? haciendo un ajuste con función polinómica de 2º grado exactamente igual que hemos hecho en los pasos anteriores:

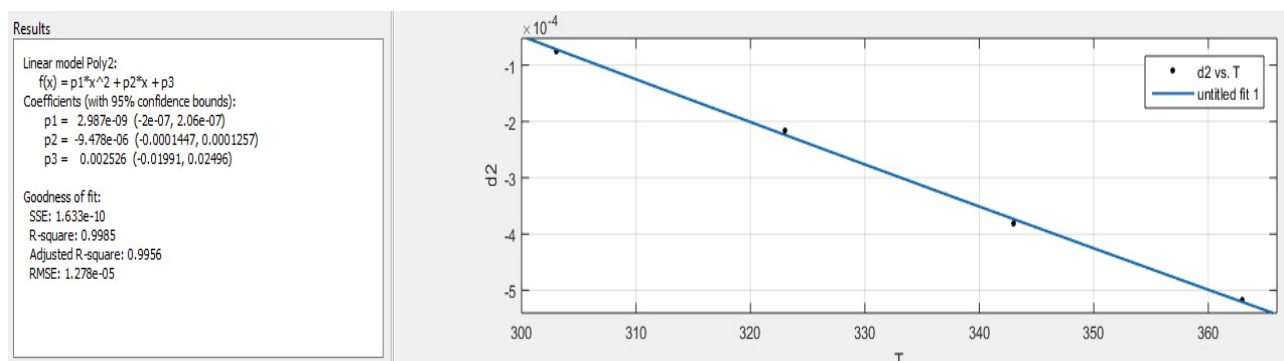
### Gráfica d1 vs T



Gráfica 9. Ajuste d1 vs Temperatura

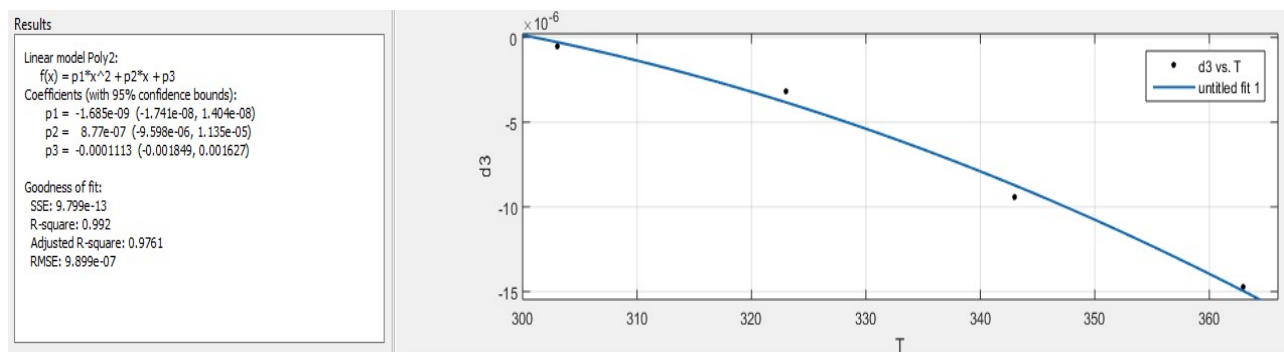
la curva que mejor se adapta a los valores es un polinomio de grado 2, tanto para d1 como para d2 y d3

### Gráfica d2 vs T



Gráfica 10. Ajuste d2 vs Temperatura

### Gráfica d3 vs T



Gráfica 11. Ajuste d3 vs Temperatura

para calcular los coeficientes del ajuste de la gráfica de  $d_1, d_2$  y  $d_3$  vs  $T$  aplicamos como en pasos anteriores el comando *polyfit*:

```
>> coefd1=polyfit(T,d1,2)
>> coefd2=polyfit(T,d2,2)
>> coefd3=polyfit(T,d3,2)
```

```
>> coefd1

coefd1 =

    -0.0000000023054148    0.000020059343223   -0.003932276103751

>> coefd2

coefd2 =

    0.0000000002987034   -0.000009478482555    0.002526083373586

>> coefd3

coefd3 =

    1.0e-03 *

    -0.000001684754819    0.000877004408336   -0.111329924912531
```

Figura 33. Vectores con los coeficientes de los ajustes de  $d_1, d_2$  y  $d_3$

por lo tanto los coeficientes se pueden expresar como funciones polinómicas de grado 2, dependientes de la  $T$ , de tal forma que en función de la temperatura de salida del colector  $T_{outcolector}$  (en K), que será la temperatura de entrada a la cámara de secado, tendremos unos u otros coeficientes.

Ecuaciones  $d = f(T)$

$$d_1 = -2.3054148 \cdot 10^{-8}(T^2) + 2.0059343223 \cdot 10^{-5}(T) - 0.00393227$$

$$d_2 = 2.987034 \cdot 10^{-9}(T^2) - 9.478482555 \cdot 10^{-6}(T) + 0,002526$$

$$d_3 = -1.684754819 \cdot 10^{-9}(T^2) + 8.770044 \cdot 10^{-7}(T) - 1.11329924 \cdot 10^{-4}$$

De ésta forma, tendremos una temperatura de aire variable a la entrada del túnel de secado, que dependerá de la temperatura de salida del colector. En función a dicha temperatura variable, de las 3 ecuaciones que se muestran arriba, resultarán unos valores de los coeficientes  $d_1, d_2$  y  $d_3$ , que entrarán en la ecuación de la derivada para dar un valor de  $D$ , mediante el cual se obtiene una humedad del lecho de algas, variable también a lo largo del tiempo, según tengamos una temperatura u otra.

Además de las humedades, también calculamos valores de contenido de agua en aire, temperatura del aire y de las algas y otras variables, todas dependientes en mayor y menor medida de las variables de entrada, y del tiempo  $t$  transcurrido.

Posteriormente buscaremos mostrar qué resultados se obtienen variando unas u otras variables del problema, tales como la longitud de la bandeja de algas, el rendimiento del colector solar, el flujo másico deseado en la cámara de secado, el espesor de la capa de algas, etc.

Ésta simulación nos permite ver qué efectos tienen los cambios que podemos realizar en parámetros modificables por nosotros en la realidad, sobre las temperaturas finales, humedades, etc.

## Capítulo 4

# Cálculos numéricos y procedimiento

En el presente capítulo se muestran los cálculos numéricos realizados paso por paso desde que se toman los datos de las temperaturas e irradiaciones medias de un día típico del mes de junio en Madrid hasta que se calculan los valores de las variables objetivo a la salida del secadero, a lo largo del tiempo. Los cálculos se realizarán para cada instante de tiempo  $p$ , donde podremos especificar el diferencial de tiempo entre cada instante,  $\Delta t$ .

De ésta forma, veremos cómo las variables que nos interesan estudiar como la temperatura del aire a la salida del túnel de secado  $T_a$ , la temperatura final del lecho de algas  $T_p$ , la humedad de las algas  $MR$ ,... cambian a medida que nos movemos en el tiempo, así podremos analizar el comportamiento de éstas variables aplicando el código MATLAB® que se ha programado con ésta finalidad y que nos permite realizar los cálculos que se explican a continuación y repetirlos (simulando que nos movemos en el tiempo) tantas veces como se quiera ampliar el estudio. Del mismo modo, podremos variar variables de entrada como el flujo másico de aire que entra en el colector y luego va a la cámara de secado  $\dot{m}_a$ , el espesor de la capa de algas  $\varepsilon$ , la altura del túnel de secado  $H$ , el ancho del lecho de algas  $W$ , etc, lo que nos permitirá analizar más en profundidad de qué manera afectan éstos cambios en los resultados finales.

### 4.1 Cálculos en el colector solar

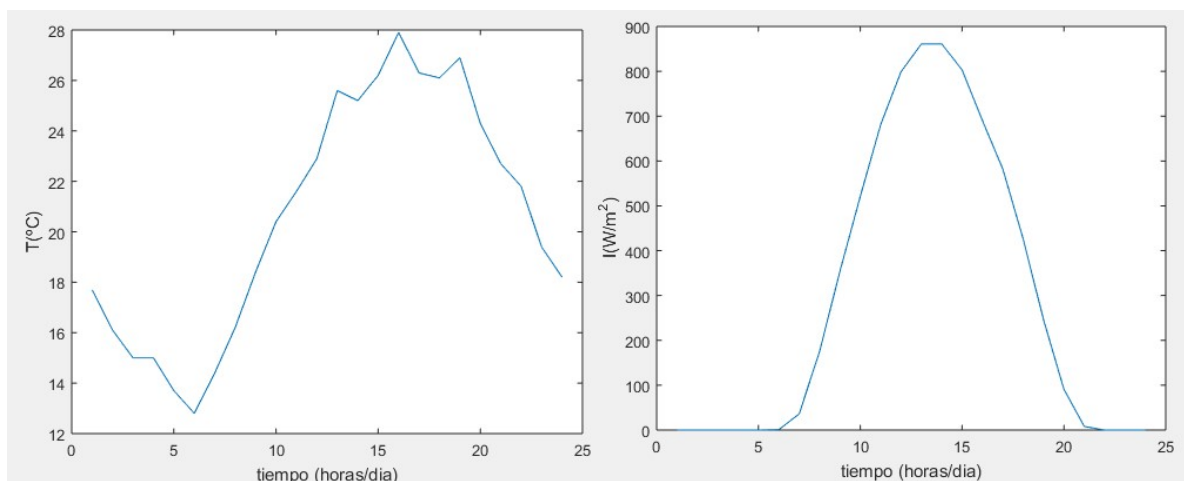
Se empieza adquiriendo los datos de las temperaturas ambiente y las irradiaciones medias de un día típico del mes de junio en la ciudad de Madrid, España. Dichos datos se tomaron de...

En la siguiente tabla se muestra la temperatura ambiente  $T$  de un día de junio (en °C), el tiempo medido en horas y las irradiaciones solares  $I$  correspondientes a cada hora (en vatios por metro cuadrado  $\frac{W}{m^2}$ )

Tjunio =	Ijunio =	horas =
17.699999999999999	0	1
16.100000000000001	0	2
15.000000000000000	0	3
15.000000000000000	0	4
13.699999999999999	0	5
12.800000000000001	1	6
14.400000000000000	36	7
16.199999999999999	175	8
18.399999999999999	354	9
20.399999999999999	521	10
21.600000000000001	681	11
22.899999999999999	799	12
25.600000000000001	861	13
25.199999999999999	861	14
26.199999999999999	803	15
27.899999999999999	690	16
26.300000000000001	582	17
26.100000000000001	426	18
26.899999999999999	246	19
24.300000000000001	91	20
22.699999999999999	8	21
21.800000000000001	0	22
19.399999999999999	0	23
18.199999999999999	0	24

Tabla 4. Temperaturas ambiente medias, irradiación media y horas del mes de Junio [40]

la siguientes gráficas representan los datos comentados en función del tiempo:



Izquierda. Gráfica 12. Tambiente junio media ( $^{\circ}\text{C}$ ) vs tiempo(horas)

Derecha. Gráfica 13. Irradiación solar media ( $\text{W/m}^2$  vs tiempo(horas)

Como se ha dicho en la descripción del caso práctico, la variable que queremos calcular es  $T_{outcolector}$ , que es la T a la que sale el aire a la salida del colector solar. Para calcular ése valor se despeja dicha temperatura de la ecuación del rendimiento del colector, de tal forma que nos quedaba:

$$T_{outcolector} = f(\text{horas del día})$$

$$T_{outcolector}(i) = \frac{\eta_{colector} * A_{colector} * I(i)}{\dot{m}_{airecolector} * C_{p_{aire}}} + T_{amb}(i)$$

el índice  $i$  indica que para cada hora del día le corresponde un valor de irradiación  $I(\frac{W}{m^2})$  y otro de  $T_{amb}$  (en K) que cogeremos de las tablas mostradas anteriormente. La repetición del proceso dará un valor de  $T_{outcolector}$  para cada valor de tiempo  $t$ . Así conseguimos representar la temperatura a la salida del colector en función de la hora del día a la que nos encontremos.

debemos dar valor al resto de variables constantes que aparecen en la ecuación:

- $\eta_{colector} \equiv \text{rendimiento del colector}$

$$\eta_{colector} = 0.75 \text{ (como se ha explicado en el capítulo anterior)}$$

- $A_{colector} \equiv \text{área del colector solar (en } m^2 \text{)}$

$$A_{colector} = 6 m^2 = 1m \text{ ancho} * 6 \text{ largo}$$

valor bastante común en colectores solares de aire destinados a secado

- $\dot{m}_{airecolector} \equiv \text{flujo másico de aire que entra y sale del colector (en } \frac{Kg}{s} \text{)}$

como dijimos, éste flujo másico va a depender del flujo másico deseado en las bandejas de algas de la cámara de secado,  $\dot{m}_{aire}$

de inicio suponemos que tenemos 4 bandejas en el túnel de secado, y queremos un flujo másico en cada una de ellas de  $0.075 \frac{Kg \text{ aire}}{s}$  por lo tanto

$$\dot{m}_{airecolector} = 4 * 0.075 = 0.3 \frac{Kg}{s}$$

- $C_{p_{aire}} \equiv \text{poder calorífico del aire (en } \frac{J}{kg * K} \text{)}$

como el poder calorífico del aire varía su valor según la temperatura del aire, con la siguiente correlación se calcula su valor exacto:

$$C_{p_{aire}}(i) = 0.07 * T_{amb}(i) + 984.68999$$



obtendremos un valor para cada temperatura de entrada del aire, correspondiente a cada una de las horas del día

si se observan las tablas, para las primeras 5 horas la irradiación  $I$  era 0 por lo que  $T_{outcolector} = T_{amb}$  desde la 1AM hasta las 5AM.

a las 6 am,  $i=6$

$$T_{amb} = 12.8^{\circ}\text{C} \equiv 285.8\text{ K}$$

$$I = 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$Cp_{aire}(6) = 1004.69599 \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}} \equiv \frac{\text{W} * \text{s}}{\text{kg} * \text{K}}$$

$$T_{outcolector}(6) = \frac{0.75 * 6 \text{ m}^2 * 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{0.3 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} * 1004.69599 \frac{\text{W} * \text{s}}{\text{kg} * \text{K}}} + 285.8\text{ K} = 285.8149\text{K}$$

hacemos lo mismo con las 7am, 8am...(i=7,8,9...24) hasta conseguir las 24 horas del día. Para representar en una gráfica

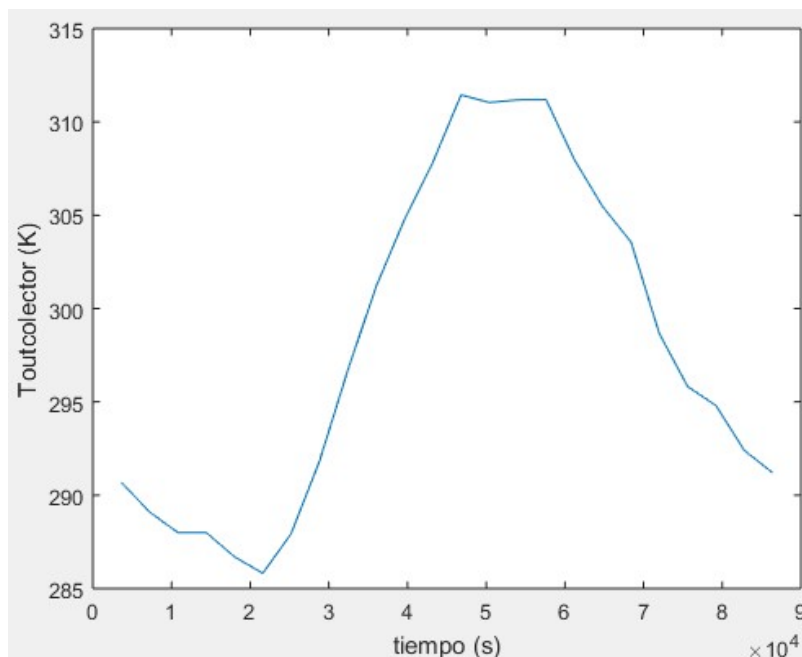
$$(x, y) = (\text{tiempo}, T_{outcolector})$$

representaremos

el tiempo en segundos, por lo que 1hora=3600 segundos

la temperatura en Kelvin, 273 kelvin= 0°C

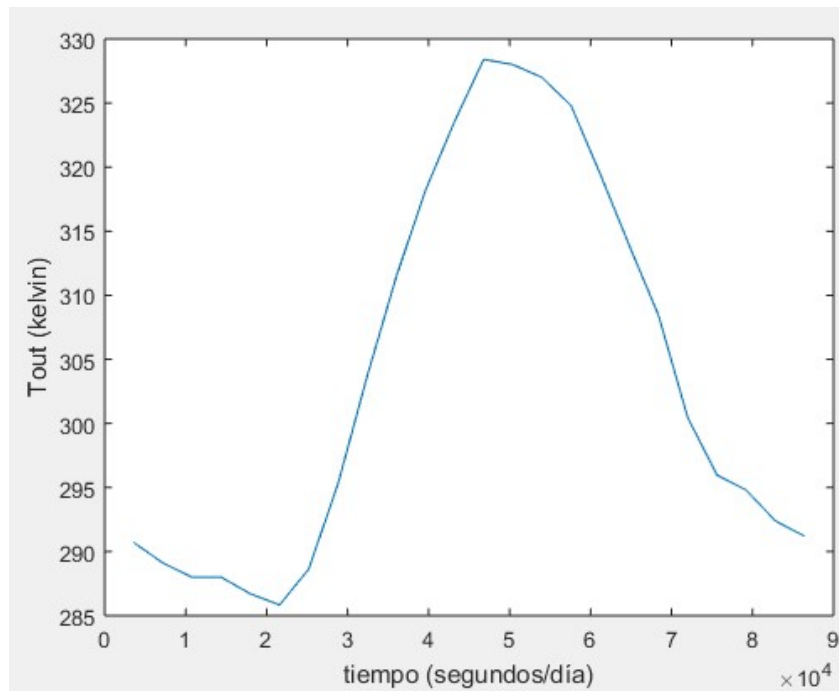
éstas unidades se van a mantener de aquí al final de los cálculos



Gráfica 14.  $T_{outcolector}$  (K) vs tiempo(s) para flujo 0.075 kg aire/s por bandeja

con otros datos, como por ejemplo

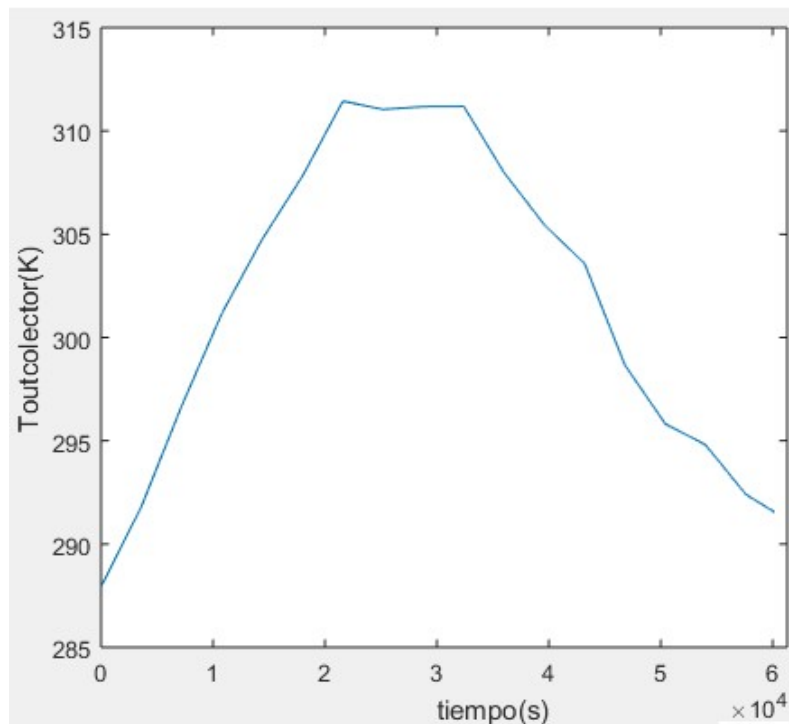
```
rend=0.65;
Acolector=6;
0.028 cada bandeja)
flujomcolector=4*0.028=0.112;
%poder calorifico aire
Cpaire=1006;
```



Gráfica 15.  $T_{outcolector}$  (K) vs tiempo(s) para flujo 0.028 kg aire/s por bandeja

Se considerará que el instante inicial  $t=0$  corresponde al inicio de nuestro proceso de secado, pero no coincide con el comienzo del día, por lo que los puntos del principio del día los tenemos que eliminar, y el momento del día en que empezamos a tomar datos lo consideraremos  $t=0$ .

Se puede ver que a partir de los 20000 segundos, es decir, las 6-7 AM aproximadamente, la temperatura ambiente empieza a subir y la irradiación comienza a manifestarse, por lo que empezaremos los datos en éste punto, y la  $T_{outcolector}$  empezará a calcularse a partir de ése momento.

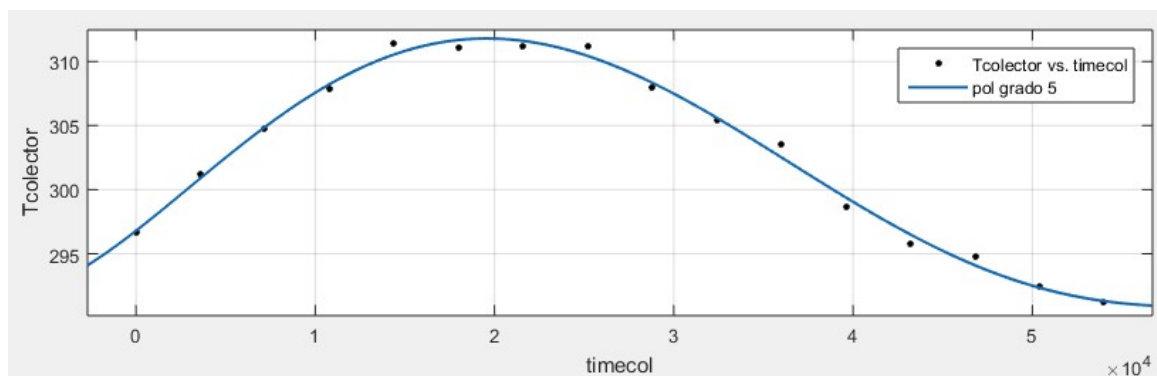


Gráfica 16.  $T_{outcolector}$  (K) vs tiempo(s) desde las 7:00 AM y flujo 0.075 kg aire/s por bandeja

Nosotros queremos saber no sólo cuál es la  $T_{outcolector}$  para cada hora del día sino poder conocer su valor en cualquier instante de tiempo  $t$  que se elija previamente. Para ello debemos ajustar la curva  $T_{outcolector}$  vs tiempo a la función polinómica que mejor se ajuste a los valores, y encontrar una expresión

$$T_{outcolector} = f(t)$$

con el comando `>>cftool` de MATLAB® podemos realizar dicho ajuste: en éste caso un polinomio de grado 5 se ajustaba muy bien a la curva, como podemos ver:



Gráfica 17. Ajuste curva tiempo vs  $T_{outcolector}$  a polinomio de grado 5

por lo que podemos expresar la  $T_{outcolector}$  con un polinomio de grado 5:

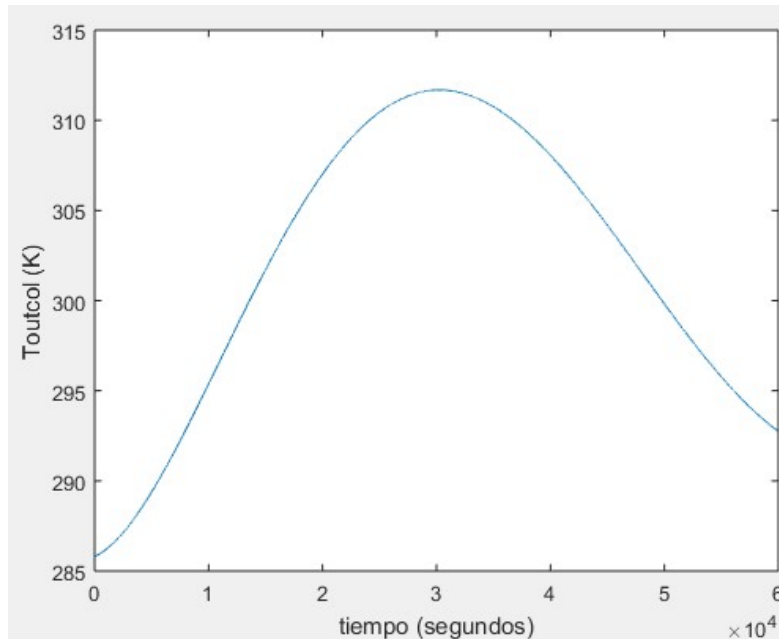
$$T_{outcolector} = A1 * t^5 + A2 * t^4 + A3 * t^3 + A4 * t^2 + A5 * t + A6$$

$A1, A2 \dots A6$  son los coeficientes de la ecuación, que con el comando `>>polyfit` se pueden obtener:

```
ccol=polyfit(timecol,Tcolector,5);
```

de ésta forma, tendremos una  $T_{outcolector}$  para cada instante de tiempo  $t$  que indicaremos en función del instante  $p$  y del diferencial de tiempo entre instantes  $\Delta t$ .

por ejemplo, vamos a establecer un  $\Delta t = 3 \text{ segundos}$  y  $p = 20000$ , es decir, se toma el valor de la  $T_{outcolector}$  cada 3 segundos durante un tiempo  $t = 20000 \cdot 3 = 60000 = 16.67 \text{ horas}$



Gráfica 18. Temperatura a la salida del colector solar ajustada a polinomio grado 5, desde 7AM

## 4.2 Cálculos en el secadero

Después de pasar por el colector solar, el aire que sale a una temperatura  $T_{outcolector}$  será usado para secar las bandejas con la masa húmeda de microalgas, colocadas en la cámara de secado. A partir de aquí, la  $T_{outcolector}$  será conocida como la temperatura del aire a la entrada del túnel/cámara de secado

$$T_{outcolector} \equiv T_{aire \text{ entrada}}$$

Hay varias variables que afectan a los resultados finales que se van a obtener, por eso se va a hacer una breve explicación de aquellas que son variables, cuáles podremos considerar constantes (porque sus variaciones apenas afectan al resultado) y qué valores suponemos para realizar los cálculos:

Variables que dependen de la *Taire entrada*:

- $Cp_{aire} \equiv$  poder calorífico del aire (en  $\frac{J}{kg \cdot K}$ )

$$Cp_{aire}(i) = 0.07 * Taire(i) + 984.68999$$

- $d_{aire} \equiv$  densidad del aire (en  $\frac{kg}{m^3}$ ), también mediante una correlación

$$d_{aire}(i) = -0.0032165 * Taire(i) + 2.1358194$$

- $\mu \equiv$  viscosidad del aire (en  $\frac{Kg}{m \cdot s}$ ), correlación

$$\mu(i) = 0.000000045 * Taire(i) + 0.00000506$$

- $k \equiv$  conductividad térmica del aire (en  $\frac{W}{m \cdot K}$ ), con correlación

$$k(i) = 0.00007115 * Taire(i) + 0.0047995$$

Variables que podemos variar nosotros:

- $H \equiv$  Altura túnel  $H$ , en metros
- $W \equiv$  Anchura de túnel de secado y de bandeja de microalgas, en  $m$
- $\Delta x \equiv$  Longitud de la bandeja de microalgas, en metros
- $\varepsilon \equiv$  Espesor de la capa de algas (productos) en metros
- $\dot{m}_a \equiv$  flujo másico de aire a la entrada de cada bandeja, en  $\frac{kg}{s}$
- $\Delta t \equiv$  intervalo de tiempo entre instante  $p$  y  $p + 1$ , en  $s$
- $p \equiv$  instantes de tiempo, unidades

Variables que podemos suponer ctes:

- $d_{agua} \equiv$  densidad del agua  $\approx$  densidad algas, en  $\frac{kg}{m^3}$

$$d_{agua} = \rho_p = \rho_w = 1000 \frac{Kg}{m^3}$$

- $Cp_{agua} \equiv$  Calor específico del agua (presente en producto) en  $\frac{J}{KgK}$

$$Cp_p = Cp_w = 4180 \frac{J}{KgK}$$

- $w_a \equiv$  contenido inicial de agua en el aire

$$w_a = w_0 \approx 7.5 \frac{\text{gr agua}}{\text{kg aire seco}} = 0,0075 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}}$$

valor típico de humedad en aire en Madrid, con una hum. relativa en torno al 10%

- $h_{fg} \equiv$  Entalpía de vaporización del agua, en  $\frac{J}{Kg}$

$$h_{fg} \approx 2,257 * 10^6 \frac{J}{Kg} \text{ lo suponemos cte}$$

- $M \equiv$  Humedad inicial del lecho de algas, adimensional

$$M_0^1 = 1 \equiv w_p^1$$

## CINÉTICA DE SECADO

Se va a explicar cómo calcular los valores de las distintas variables que queremos analizar, suponiendo una  $T_{aire}$  a la entrada del túnel de secado constante de 40 °C=313K, para el instante inicial  $p=0,1y2$  y una variación del tiempo de  $\Delta t = 3s$

Empezaremos viendo cómo varía la humedad  $M$  del lodo de algas, para ello nos metemos en la cinética de secado explicada antes, donde la derivada será:

$$D_{40}^p = \frac{dhum_{40}}{dtiempo} = \frac{dM_{40}}{dt}$$

pero vimos que al poder ajustar la curva de la humedad a una función polinómica cúbica, su derivada podía expresarse como la derivada de dicha función:

$$D_{40}^p = d_{40_1} M_{40}^{p^2} + d_{40_2} M_{40}^p + d_{40_3}$$

los coeficientes  $d1, d2...$  ya están calculados gracias al ajuste hecho anteriormente en MATLAB®, entonces recuperando los datos:

$$d1 = -2.3054148 * 10^{-8} (T_{aire}^2) + 2.0059343223 * 10^{-5} (T_{aire}) - 0.00393227$$

$$d2 = 2.987034 * 10^{-9} (T_{aire}^2) - 9.478482555 * 10^{-6} (T_{aire}) + 0,002526$$

$$d3 = -1.684754819 * 10^{-9} (T_{air}^2) + 8.770044 * 10^{-7} (T_{air}) - 1.11329924 * 10^{-4}$$

$$d1 = 8.77065 * 10^{-5}$$

$$d2 = -1.48045 * 10^{-4}$$

$$d3 = -1.88129 * 10^{-6}$$

el valor de dichos coeficientes lo meteremos en la ecuación anterior de la derivada y como a la entrada la humedad inicial es  $M_{40}^0 = 1$  se calcula el valor de la derivada, para el instante inicial  $p=0$ :

$$D_{40}^{p=0} = 8.77065 * 10^{-5} * 1^2 + (-1.48045 * 10^{-4} * 1) - 1.88129 * 10^{-6} =$$

$$D_{50}^{p=0} = -6.221966 * 10^{-5}$$

de la ecuación de la derivada con diferenciales, si la expresamos con incrementos queda lo siguiente:

$$D_{40}^p = \frac{dM}{dt} = \frac{M_{40}^{p+1} - M_{40}^p}{\Delta t}$$

como se trata del instante inicial se considera  $p=0$  y  $p+l=l$ :

$$D_{40}^{p=0} = \frac{M_{40}^{p=1} - M_{40}^{p=0}}{\Delta t} \text{ despejamos } M_{40}^{p=1} \rightarrow$$

$$M_{40}^1 = D_{40}^{p=0} \Delta t + M_{40}^{p=0} \rightarrow \text{sustituimos datos conocidos} \rightarrow$$

$$M_{40}^{p=1} = (-6.221966 * 10^{-5}) * 3 + 1 = 0.999813341$$

se aprecia que la humedad para el instante  $p=l$  desciende, lo que es lógico pues si se avanza en el tiempo el contenido de agua presente en las algas irá disminuyendo.

instante  $p=2$

$$M_{40}^2 = D_{40}^1 * 3 + M_{40}^1 \rightarrow \text{donde } D_{40}^1 =$$

$$D_{40}^1 = 8.77065 * 10^{-5} * (M_{40}^1)^2 + (-1.48045 * 10^{-4} * M_{40}^1) - 1.88129 * 10^{-6} =$$

$$D_{40}^1 = 8.77065 * 10^{-5} * (0.999813341)^2 + (-1.48045 * 10^{-4} * 0.999813341) - 1.88129 * 10^{-6} =$$

$$= -6.222476 * 10^{-5}$$

$$\text{humedad } M_{40}^2 = D_{40}^1(\Delta t) + M_{40}^1 =$$

$$M_{50}^2 = (-6.222476 * 10^{-5}) * 3 + 0.999813341 = 0.999626667$$

Podemos crear una función programada en MATLAB® que permita calcular todas las humedades según el número de instantes que se quieran representar y según la temperatura del aire a la entrada aunque ahora la estemos considerando constante. De ésta forma los cálculos se harán de forma repetida y automática:

### ***código cálculo humedades de forma iterativa***

```
for i=1:p+1
    %Taire(i)=Toutcol(i);
    Taire(i)=313;
    Talga=Tpini+273;
    %cálculo de los coeficientes d1,d2 y d3 en función de la T, para
    %poder obtener la expresión de la derivada
    d1(i)=(coefd1(1)*(Taire(i)^2))+(coefd1(2)*Taire(i))+coefd1(3);
    d2(i)=(coefd2(1)*(Taire(i)^2))+(coefd2(2)*Taire(i))+coefd2(3);
    d3(i)=(coefd3(1)*(Taire(i)^2))+(coefd3(2)*Taire(i))+coefd3(3);
    %cálculo de la derivada, para el valor inicial de humedad
    Deriv(1)=(d1(1)*(HUM(1)^2)) + (d2(1)*HUM(1)) + d3(1);
end
%repetimos tantas veces como indiquemos según valor del instante p
for i=2:p+1
    t(i)=At+t(i-1);
    HUM(i)=(Deriv(i-1)*At)+HUM(i-1);
    Deriv(i)=(d1(i)*(HUM(i)^2)) + (d2(i)*HUM(i)) + d3(i);
end
```

en función al valor del instante  $p$ , podremos calcular los tiempos que se quieran, siempre indicando el número deseado. Se creará a la vez otro vector que será el tiempo, y que durará tantos incrementos  $\Delta t$  como tamaño  $p$  se especifique en el problema.

Éste código está integrado en el código final que permite calcular todo lo explicado en bloque.

## **VARIABLES OBJETIVO**

$$n_{w_{out}}^p$$

la expresión se explicó anteriormente, llegando a:

$$n_{w_{out}}^p = -\frac{\frac{dx^p}{dt}\rho_p}{a_p} = -\frac{\frac{dw_p}{dt}\rho_p}{a_p}$$

→ los diferenciales pasan a incrementos →

$$n_{w_{out}}^p = -\frac{\frac{w_p^{p+1} - w_p^p}{\Delta t}\rho_p}{a_p} \rightarrow n_{w_{out}}^0 = -\frac{\frac{w_p^1 - w_p^0}{\Delta t}\rho_p}{a_p}$$

de la ecuación conocemos:



$$d_{agua} = \rho_p = \rho_w = 1000 \frac{Kg}{m^3}$$

para una bandeja de largo  $\Delta x = 1m$ , ancho  $W = 1m$  y espesor de capa de algas  $\varepsilon = 0.029cm$

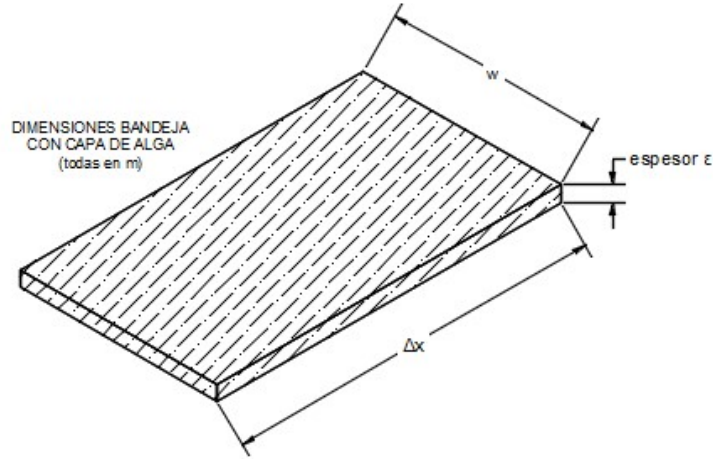


Figura 15. Dimensiones bandeja de microalgas (Autocad)

$$\text{relación } a_p = \frac{A_p}{V_p} = \frac{W * \Delta x}{W * \Delta x * \varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} \rightarrow \varepsilon = 3cm \rightarrow a_p = \frac{1}{0.029m} = 34.483m^{-1}$$

$$\Delta t = 3 \text{ segundos}$$

$$w_{prod/algas}^{p=0} \rightarrow \text{la humedad inicial como se explicó antes, } X_0 = M_{40}^{p=0} = 1$$

$$w_p^1 = M_{40}^{p=1} \text{ calculado antes} = 0.999813341$$

entonces sustituimos en la expresión:

$$n_{w_{out}}^0 = - \frac{\frac{w_p^1 - w_p^0}{\Delta t} \rho_p}{a_p} = - \frac{\frac{0.999813341 - 1}{3s} 1000 \frac{kg}{m^3}}{34.483 \frac{1}{m}} =$$

$$n_{w_{out}}^0 = 1.80437 * 10^{-3} \frac{kg}{m^2s}$$

$w_{a_{out}}^p$

tenemos la siguiente ecuación, cuyo desarrollo se explicó en el apartado anterior

$$w_{a_{out}}^p = \frac{\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon S} w_{a_{in}}^p + \frac{\Delta t * n_w^p}{\rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon) + w_{a_{out}}^{p-1}\right)}{1 + \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon S}}$$

instante inicial  $p=0$

$$w_{a_{out}}^0 = \frac{\left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon S} w_{a_{in}}^0 + \frac{\Delta t * n_w^0}{\rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon) + w_{a_{out}}^{p-1}\right)}{1 + \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon S}}$$

debemos saber lo siguiente:

$$n_w^0 = 1.80437 * 10^{-3} \frac{kg}{m^2 s} \text{ calculado antes}$$

$$\dot{m}_a \equiv \text{flujo másico de aire a la entrada de cada bandeja} = 0.075 \frac{kg}{s}$$

$w_{a_{in}}^p$ ,  $w_{a_{out}}^{p-1}$  coinciden con el contenido de agua en aire inicial, por las condiciones de contorno, pero esto solo sucede en el instante inicial  $p=0$ , para el resto de instantes posteriores,  $w_{a_{in}}^{p-1}$  será la del caso anterior.

$$w_{a_{in}}^p = w_{a_{in}}^0 = w_0 \approx 7.5 \frac{gr \text{ agua}}{kg \text{ aire seco}} = 0,0075 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire seco}} \equiv w_{a_{out}}^{p-1}$$

mismas dimensiones, mismo  $\Delta t$  y misma relación  $a_p$

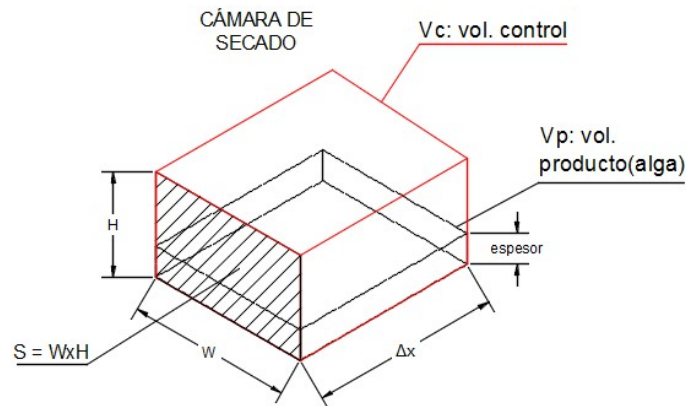


Figura 19. Detalle volumen de control aire y alga

$V_c \equiv \text{volumen de control en la cámara de secado} =$

$$= \text{alto} * \text{ancho} * \text{largo} = H * W * \Delta x = S * \Delta x = 0.03m * 1m * 1m = 0.03 m^3$$

$$S = \text{superficie sección transversal túnel} = H * W = 0.03 * 1 = 0.03 m^2$$

$d_{\text{aire}} \equiv \text{densidad del aire (en } \frac{kg}{m^3} \text{)},$

$$d_{\text{aire}} = -0.0032165 * T_{\text{aire}}(40\text{grados}) + 2.1358194 = 1.129054 \frac{Kg}{m^3}$$

$$V_{\text{control}} = V_{\text{producto}} + V_{\text{aire}} = W * \Delta x * \varepsilon + V_{\text{aire}} = 1m * 1m * 0.029m + V_{\text{aire}}$$

antes hemos calculado  $V_{\text{control}} = V_c = 0.03 m^3 \rightarrow \text{entonces}$

$$V_{\text{aire}} = 0.03 - 0.029 = 0.001 m^3 = 1 * 10^{-3} m^3$$

masa de aire  $m_a$  contenida en ese volumen de aire:

$$m_a = \rho_a V_a = 1.129054 \frac{Kg}{m^3} * 0.001 m^3 = 1.129054 * 10^{-3} kg = 0.001129054 kg$$

entonces para  $p=0$ :

$$W_a^p = W_a^0 = \frac{(\frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon S} w_{a_{n-1}}^0 + \frac{\Delta t * n_w^0}{\rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon) + w_{a_n}^{p-1})}{1 + \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon S}}$$

por comodidad y para no arrastrar tantas variables se agrupan antes varias variables como  $\frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon S}$ .

conocemos todas las variables incluido el término de flujo másico de aire  $\dot{m}_a = 0.075 kg/s$  que lo conocemos de antes

En nuestro caso el flujo que se da dentro del túnel de secado y durante el proceso es un flujo interno, se llama así porque es un flujo de aire confinado que no puede salir al exterior, ya que se lo impiden las paredes del túnel.

No consideraremos el desarrollo de la capa límite, para simplificar los resultados, por lo que consideraremos el flujo completamente desarrollado desde la entrada hasta la salida al secador.

El número de Reynolds se define como

$$Re_D = \frac{\rho_a U_m D_h}{\mu} \text{ expresado en función de la velocidad del fluido (aire) } U_m$$

$\mu \equiv$  viscosidad del fluido (aire), a 40°C:

$$\mu = 0.000000045 * 313K + 0.00000506 = 0.19145 * 10^{-4} \frac{Kg}{m * s}$$

$U_m \equiv$  vel. media del fluido (aire)

$$U_m = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a * Area}$$

donde  $A \equiv$  Área transversal x donde pasa el fluido(aire)

$Area =$  superficie transversal túnel – superficie trans. capa algas

$$Area = S - (\varepsilon * W) = 0.001 m^2$$

volvemos a la fórmula del Reynolds y la expresamos en función del flujo másico a la entrada de la cámara de secado

$$Re_D = \frac{\rho_a U_m D_h}{\mu} = \frac{\rho_a \frac{\dot{m}_a}{\rho_a * A} D_h}{\mu} = \frac{\dot{m}_a D_h}{\mu * A}$$

$D_h \equiv$  diámetro hidráulico

Cuando el conducto es una tubería, D es el diámetro interno de la tubería. Cuando no se trata de un ducto circular como es el caso, se emplea el diámetro equivalente ( $D_e$ ) o diámetro hidráulico ( $D_h$ ) definido como:

$D_h \equiv$  diámetro hidráulico  $\rightarrow$

$$\rightarrow D_h = 4 * \frac{\text{Área transversal de flujo}}{\text{Perímetro mojado}} = 4 * \frac{S - (\varepsilon * W)}{2W + 2(H - \varepsilon)} =$$

$$= 4 * \frac{0.001 m^2}{2 * 1m + 2 * 0.001m} = 0.001998 m$$

ya tenemos todos los datos para calcular el Reynolds en función del  $\dot{m}_a$ :

$$Re_D = \frac{\dot{m}_a D_h}{\mu * A} = \frac{0.075 \frac{Kg}{s} * 0.001998 m}{0.19145 * 10^{-4} \frac{Kg}{m * s} * 0.001 m^2} =$$

$$Re_D = 7827.1089$$

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon S} = \frac{3seg}{1m} \frac{0.075 \frac{Kg}{s}}{1.129054 \frac{Kg}{m^3} * 0.029m * 0.03m^2} = 229.0596284m^{-1}$$

$$a_p(1 - \varepsilon) = 33.4829$$

entonces volvemos a la fórmula  $w_{a_n}^0$

$$w_{a_n}^0 = \frac{\left( \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon S} w_{a_{n-1}}^0 + \frac{\Delta t * n_w^0}{\rho_a \varepsilon} a_p(1 - \varepsilon) + w_{a_n}^{p-1} \right)}{1 + \frac{\Delta t}{\Delta x} \frac{\dot{m}_a}{\rho_a \varepsilon S}}$$

$$= \frac{\left( \left( 229.0596284m^{-1} * 0.0075 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire}} \right) + \left( \left( \frac{3seg * 1.80437 * 10^{-3} \frac{kg}{m^2 s}}{1.129054 \frac{Kg}{m^3} * 0.029m} \right) * 33.4829 \right) + 0.0075 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire}} \right)}{1 + 229.0596284m^{-1}}$$

$$w_{a_n}^0 = 0.031561 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire}}$$

## $T_{a_{out}}^p$

Como se explicó anteriormente, la temperatura en el aire se comportaba así:

$$T_{a_{out}}^p = \frac{\frac{T_{a_{out}}^{p-1}}{\Delta t} + \frac{\dot{m}_a}{\rho_a V_a} T_{a_{in}}^p + \frac{h_c}{C_{pa} \rho_a \varepsilon} a_p(1 - \varepsilon) T_{p_{out}}^p}{\frac{\dot{m}_a}{\rho_a V_a} + \frac{h_c}{C_{pa} \rho_a \varepsilon} a_p(1 - \varepsilon) + \frac{1}{\Delta t}}$$

igual que antes, tenemos que para el instante inicial

$$T_{a_{out}}^0 = \frac{\frac{T_{a_{out}}^{p-1}}{\Delta t} + \frac{\dot{m}_a}{\rho_a V_a} T_{a_{in}}^0 + \frac{h_c}{C_{pa} \rho_a \varepsilon} a_p(1 - \varepsilon) T_{p_{out}}^0}{\frac{\dot{m}_a}{\rho_a V_a} + \frac{h_c}{C_{pa} \rho_a \varepsilon} a_p(1 - \varepsilon) + \frac{1}{\Delta t}}$$

Aparecen datos que se requiere calcular antes de sustituir los valores ya conocidos

Como se ha descrito en el caso práctico, nos encontramos ante una convección forzada, pues hay movimiento de fluido (aire) originado por algún efecto mecánico (bomba ó ventilador).

La convección siempre aumenta el flujo de calor y por eso el parámetro adimensional con que se evalúa es el número de Nusselt, que puede definirse como

$$Nu = \frac{h_c L}{k}$$

donde h y k son el coeficiente de convección y la conductividad térmica del fluido (Aire) y L una longitud característica o diámetro hidráulico D,

$h_c$ : *coeficiente de convección del aire*

el cual vamos a calcular de la siguiente forma

$$h_c = \frac{k * Nu}{D}$$

Como se dijo en el Marco Teórico, para flujo interno en procesos de secado se puede usar la siguiente correlación empírica adimensional para el cálculo del número de Nusselt:

$$Nu = 0.11 * Re^{0.71} Pr^{1/3}$$

el n° de Reynolds quedaba de la siguiente manera:

$$Re_D = \frac{\dot{m}_a D_h}{\mu * A} = 7827.1089$$

En la correlación también tenemos otra variable, el número de Prandtl,  $Pr$

$$Pr = \frac{C_{p\text{aire}} * \mu}{k} = \frac{1006.59 \frac{J}{Kg * K} * 0.19145 * 10^{-4} \frac{Kg}{m * s}}{k}$$

Por lo tanto necesitamos calcular el coeficiente de conductividad térmica del aire  $k$ , que dependerá de la temperatura del aire que circule por el túnel,  $T_{\text{aire}}$ , mediante una correlación:

$$k(40 \text{ grados}) = 0.00007115 * 313 + 0.0047995 = 0.02706945 \frac{W}{m * K}$$

entonces el número de Prandtl

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{k} = \frac{1006.59 \frac{J}{Kg * K} * 0.19145 * 10^{-4} \frac{Kg}{m * s}}{0.02706945 \frac{W}{m * K}} = 0.7119227$$

con el  $Re_D$  y el  $Pr$  podemos calcular el número de Nusselt:

$$\begin{aligned} Nu &= 0.11 * Re^{0.71} Pr^{1/3} \\ &= 0.11 * (7827.1089)^{0.71} * (0.7119227)^{1/3} = \\ Nu &= 57.1032628 \end{aligned}$$

con el número de Nusselt se obtiene el coeficiente de convección  $h_c$ :

$$h_c = \frac{k * Nu}{D_h} = \frac{0.02706945 \frac{W}{m * K} * 57.1032628}{0.001998m} = 773.6498 \frac{W}{m^2 K}$$

el resto de variables que conocemos:

$$T_{a_{out}}^0 = T_{a_{out}}^{p-1} = T_{a_{in}}^p = 40^\circ C = 313 K, \text{ por las condiciones de contorno}$$

aunque en el resto,  $T_{a_{out}}^{p-1}$  será la T del caso anterior

entonces tenemos lo siguiente (metemos la temperatura en K):

$$\begin{aligned} T_{a_{out}}^0 &= \frac{\frac{T_{a_{out}}^{p-1}}{\Delta t} + \frac{\dot{m}_a}{\rho_a V_a} T_{a_{in}}^0 + \frac{h_c}{C_{p_a} \rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon) * T_{p_{out}}^0}{\frac{\dot{m}_a}{\rho_a V_a} + \frac{h_c}{C_{p_a} \rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon) + \frac{1}{\Delta t}} \\ m_a &= \rho_a V_a = 1.129054 \frac{Kg}{m^3} * 0.001 m^3 = 1.129054 * 10^{-3} kg \\ T_{a_{out}}^0 &= \frac{\frac{313 K}{3s} + \frac{0,075 \frac{Kg}{s}}{1.129054 * 10^{-3} kg} * 313 K + \frac{773.6498 \frac{W}{m^2 K}}{1006.59 \frac{J}{KgK} * 1.129054 \frac{Kg}{m^3} * 0,029m} 33.4829 * T_{p_{out}}^0}{\frac{0,075 \frac{Kg}{s}}{1.129054 * 10^{-3} kg} + \frac{773.6498 \frac{W}{m^2 K}}{1006.59 \frac{J}{KgK} * 1.129054 \frac{Kg}{m^3} * 0,029m} 33.4829 + \frac{1}{3s}} \rightarrow \end{aligned}$$

para simplificar, agrupamos cálculos numéricos y será más cómodo operar con ellos

$$\begin{aligned} T_{a_{out}}^0 &= \frac{B^0 + C * 313 K + D * T_{p_{out}}^0}{C + D + \frac{1}{3s}} \\ B^0 &= \frac{T_{a_{out}}^{p-1}}{\Delta t} = 104.3 \frac{K}{s} \end{aligned}$$

$$C = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a V_a} = 66.4272 s^{-1}$$

$$D = \frac{h_c}{C_{p_a} \rho_a \varepsilon} a_p (1 - \varepsilon) = 785.951 s^{-1}$$

$$E^0 = B^0 + C * T = 20896.059 \frac{k}{s}$$

$$F = C + D + \frac{1}{\Delta t} = 852.7119 s^{-1}$$

$$\begin{aligned} T_{a_{out}}^0 &= \frac{104.3 \frac{k}{s} + 20791.7136 \frac{k}{s} + 785.951 s^{-1} * T_p^0}{66.4272 s^{-1} + 785.951 s^{-1} + 0.33 s^{-1}} \\ T_{a_{out}}^0 &= \frac{E^0 + D * T_p^0}{F} \\ &= \frac{20896.059 \frac{k}{s} + 785.951 s^{-1} * T_p^0}{852.7119 s^{-1}} \quad (1) \end{aligned}$$

tenemos como variables  $T_{a_{out}}^0$  y  $T_{p_{out}}^0$

**$T_{p_{out}}^p$**

cuando se desarrolló se llegó a la siguiente expresión para la temperatura en el producto:

$$T_{p_{out}}^p = \frac{\frac{h_c a_p T_{a_{out}}^p}{\rho_p C_{p_p}} - \frac{n_w^p a_p h_{f_g}}{\rho_p C_{p_p}} + \frac{T_{p_{out}}^{p-1}}{\Delta t}}{\frac{1}{\Delta t} + \frac{h_c a_p}{\rho_p C_{p_p}}}$$

en el instante inicial  $p=0$

$$T_{p_{out}}^0 = \frac{\frac{h_c a_p T_{a_{out}}^0}{\rho_p C_{p_p}} - \frac{n_w^0 a_p h_{f_g}}{\rho_p C_{p_p}} + \frac{T_{p_{out}}^{p-1}}{\Delta t}}{\frac{1}{\Delta t} + \frac{h_c a_p}{\rho_p C_{p_p}}}$$



muchos datos se repiten, hay otros que conocemos:

$$\text{Coeficiente de convección } h_c \approx 773.6498 \frac{W}{m^2 K}$$

$$\text{Entalpía de vaporización } h_{fg} \approx 2,257 * 10^6 \frac{J}{Kg}$$

$$\text{Temperatura del lodo de algas } T_{p_{out}}^p \equiv T_{p_{out}}^0 \approx 20^\circ C \equiv 293K$$

$T_{p_{out}}^{p-1} = T_{p_{out}}^p$  solo para el instante inicial, el resto son las temperaturas de los casos anteriores

$$T_{p_{out}}^0 = \frac{\frac{h_c a_p T_{a_{out}}^0}{\rho_p C_{pp}} - \frac{n_{wn}^0 a_p h_{fg}}{\rho_p C_{pp}} + \frac{T_{p_{out}}^{p-1}}{\Delta t}}{\frac{1}{\Delta t} + \frac{h_c a_p}{\rho_p C_{pp}}} \rightarrow \text{sustituimos valores} \rightarrow$$

$$= \frac{\frac{773.6498 \frac{W}{m^2 K} * 34.483 m^{-1} * T_{a_{out}}^0}{1000 \frac{Kg}{m^3} * 4180 \frac{J}{Kg K}} - \frac{1.80437 * 10^{-3} \frac{kg}{m^2 s} * 34.483 m^{-1} * 2,257 * 10^6 \frac{J}{Kg}}{1000 \frac{Kg}{m^3} * 4180 \frac{J}{Kg K}} + \frac{293K}{3s}}{\frac{1}{3s} + \frac{773.6498 \frac{W}{m^2 K} * 34.483 m^{-1}}{1000 \frac{Kg}{m^3} * 4180 \frac{J}{Kg K}}}$$

$$G = \frac{h_c a_p}{\rho_p C_{pp}} = 0.0063821963 s^{-1}$$

$$H^0 = \frac{n_{w_{out}}^0 a_p h_{fg}}{\rho_p C_{pp}} = 0.03359564 \frac{K}{s}$$

$$I^0 = \frac{T_{p_{out}}^{p-1}}{\Delta t} = 97.66666 \frac{K}{s}$$

$$J^0 = -H^0 + I^0 = 97.633071 \frac{K}{s}$$

$$T_{p_{out}}^0 = \frac{(G * T_a^0) - H^0 + I^0}{\frac{1}{\Delta t} + G}$$

$$= \frac{(0.0063821963s^{-1} * T_{a_{out}}^0) - 0.03359564 \frac{K}{s} + 97.66666 \frac{K}{s}}{0,33s^{-1} + 0.0063821963s^{-1}} =$$

$$T_{p_{out}}^0 = \frac{(G * T_{a_{out}}^0) + J^0}{\frac{1}{\Delta t} + G}$$

$$T_{p_{out}}^0 = \frac{(0.0063821963 * 10^{-4}s^{-1} * T_{a_{out}}^0) + 97.633071 \frac{K}{s}}{0,33s^{-1} + 0.0063821963s^{-1}} \quad (2)$$

vemos que las variables son  $T_{p_{out}}^0$  y  $T_{a_{out}}^0$

por lo que tenemos dos ecuaciones con dos incógnitas, cogemos  $T_{a_{out}}^0$  de la (1) y lo sustituimos en la (2):

$$T_{a_{out}}^0 = \frac{E^0 + D * T_{p_{out}}^0}{F}$$

$$T_{a_{out}}^0 = \frac{20896.059 \frac{k}{s} + 785.951s^{-1} * T_{p_{out}}^0}{852.7119s^{-1}} \rightarrow \text{sustituimos en (2)} \rightarrow$$

$$\begin{aligned} T_{p_{out}}^0 &= \frac{(G * T_{a_{out}}^0) + J^0}{\frac{1}{\Delta t} + G} = \frac{\left( G * \left( \frac{E^0 + D * T_{p_{out}}^0}{F} \right) \right) + J^0}{\frac{1}{\Delta t} + G} = \frac{\left( \frac{G * E^0 + G * D * T_{p_{out}}^0}{F} \right) + J^0}{\frac{1}{\Delta t} + G} \\ &= \frac{\frac{G * E^0}{F} + \frac{G * D}{F} * T_{p_{out}}^0 + J^0}{\frac{1}{\Delta t} + G} \rightarrow \end{aligned}$$

$$K^0 = \frac{G * E^0}{F} = \frac{0.0063821963s^{-1} * 20896.059 \frac{k}{s}}{852.7119s^{-1}} = 0.15639835 \frac{k}{s}$$

$$L = \frac{G * D}{F} = \frac{0.0063821963s^{-1} * 785.951s^{-1}}{852.7119s^{-1}} = 0.005882521s^{-1}$$

$$M = \frac{1}{\Delta t} + G = 0,3333333s^{-1} + 0.0063821963 s^{-1} = 0.3397155296412s^{-1} \rightarrow$$

$$T_{p_{out}}^0 = \frac{K^0 + L * T_p^0 + J^0}{M} \rightarrow (M - L) * T_{p_{out}}^0 = K^0 + J^0$$

$$T_{p_{out}}^0 = \frac{K^0 + J^0}{(M - L)} = \frac{0.15639835 \frac{k}{s} + 97.633071 \frac{K}{s}}{(0.3397155296412s^{-1} - 0.005882521s^{-1})}$$

$$T_{p_{out}}^0 = 292.92929957K = 19.92^{\circ}C$$

$$T_{a_{out}}^0 = \frac{E^0 + D * T_{p_{out}}^0}{F} = \frac{20896.059 \frac{k}{s} + 785.951s^{-1} * 292.92929957K}{852.7119s^{-1}} =$$

$$T_{a_{out}}^0 = 294.500675K = 21.50^{\circ}C$$

Este mismo proceso es el que se realizará para calcular las variables y los pasos anteriormente explicados, para distintos instantes  $p$  a medida que avanzamos en el tiempo.

De éste modo, si nosotros deseamos ver qué ocurre en un futuro cercano, bastará con especificar en el código a la entrada un número de instantes  $p$ , que corresponderán a un *tiempo total de proceso de secado*  $= p * \Delta t$ . Por ejemplo, si queremos analizar qué va a ocurrir en las próximas 3 horas, y estamos usando un  $\Delta t = 3 \text{ segundos}$ , necesitaremos  $p = \frac{3 \text{ horas} * 3600 \text{ /hora}}{\Delta t} = 3600$ . Meteremos en el código  $p=3600$  y las variables de entrada que consideremos oportunas, y el código creará vectores de datos de las variables objetivo, que podremos representar en función del tiempo, de otras variables, etc.

## Capítulo 5

# Representación y análisis de los resultados

## 5.1 Variables del proceso de secado

En éste capítulo se van a mostrar unos resultados que intentan abarcar gran cantidad de posibles situaciones reales que podamos puedan encontrarse a la hora de estudiar el proceso de secado solar de microalgas. No obstante es importante decir que además de los siguientes resultados, el usuario podrá generar tantos ó situaciones ‘reales’ como desee, es una de las ventajas que te permite ésta simulación, la libertad para estudiar distintos casos en función a las distintas condiciones iniciales y de contorno que impongamos al principio.

Antes de nada es importante mencionar que estamos considerando que lo que ocurre para una bandeja de algas, ocurre para el resto de la misma forma y para los mismos instantes de tiempo.

### CASO 1

#### Condiciones iniciales

##### Lecho de algas

*Temperatura inicial del lecho de microalgas húmedas  $T_p = 12^{\circ}\text{C}$*

*espesor de la capa de microalgas en cada bandeja  $\varepsilon = 0.03\text{m}$*

*número de bandejas de microalgas en la cámara de secado  $n = 4$*

*flujo másico de aire a la entrada de cada bandeja  $\dot{m}_{\text{aire}} = 0.075\text{ kg/s}$*

*anchura bandejas = anchura tunel de secado  $W = 1\text{m}$*

*longitud bandeja microalgas  $\Delta x = 1\text{m}$*

##### Cámara/túnel de secado

*altura  $H = 0.03\text{m}$*

*anchura  $W = 1\text{m}$*

##### Colector Solar de aire

*rendimiento del colector  $\eta_{\text{colector}} = 75\% = 0.75$*

*área del colector  $A_{\text{colector}} = 6\text{ m}^2$*

*flujo másico de aire a la entrada  $\dot{m}_{\text{airecolector}} = n * \dot{m}_{\text{aire}} = 4 * 0.075 = 0.3\text{ kg/s}$*

*$T_{\text{amb}}(i)$ : temperaturas importadas de 1 día de junio, desde las 7AM*

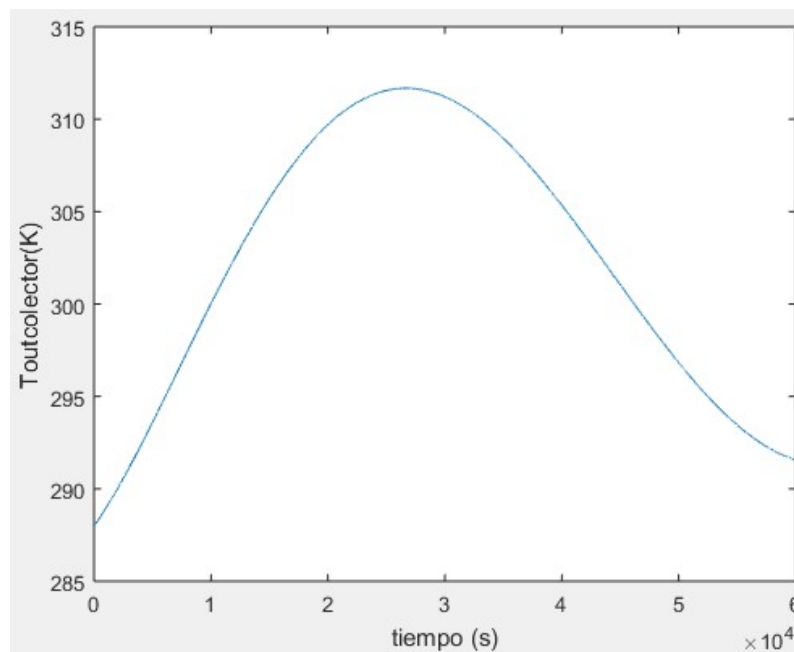
*$I(i)$ : irradiaciones importadas de 1 día de junio, desde las 7AM*

##### Tiempo e instantes

*intervalos de tiempo entre cada instante  $\Delta t = 3\text{segundos}$*

*instantes  $p = 20000$*

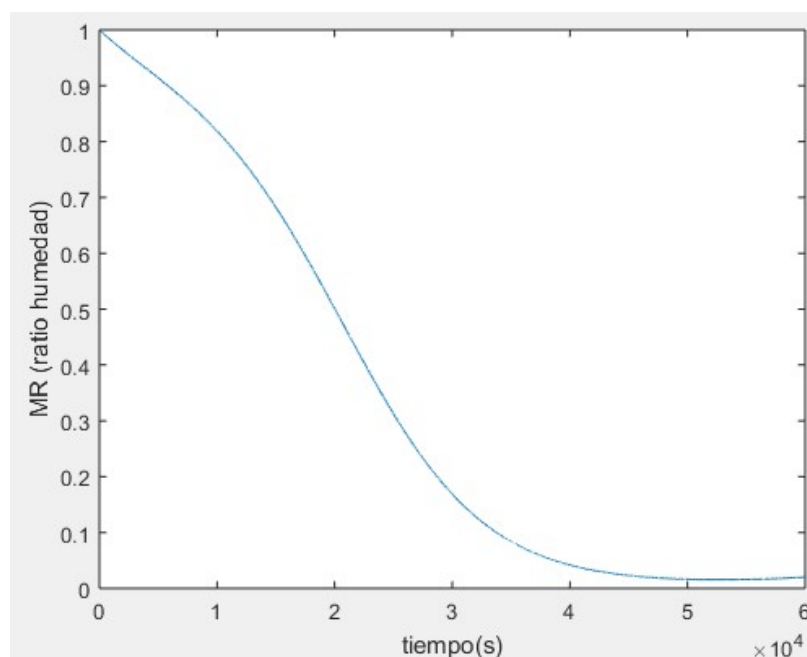
Temperatura a la salida del colector de aire,  $T_{outcolector}$



Gráfica 19.  $T_{outcolector}$  vs tiempo caso I

Vemos que para  $p=0$  (7AM aprox) el aire sale del colector a unos 14 °C (está amaneciendo), llega a valores máximos de casi 40 °C entre las 15:00-16:00 y desciende hasta los 20°C a última hora del día. Éste comportamiento es lógico pues las  $T_{ambiente}$  e irradiaciones son más altas justo a mediodía como vimos el principio de los cálculos numéricos.

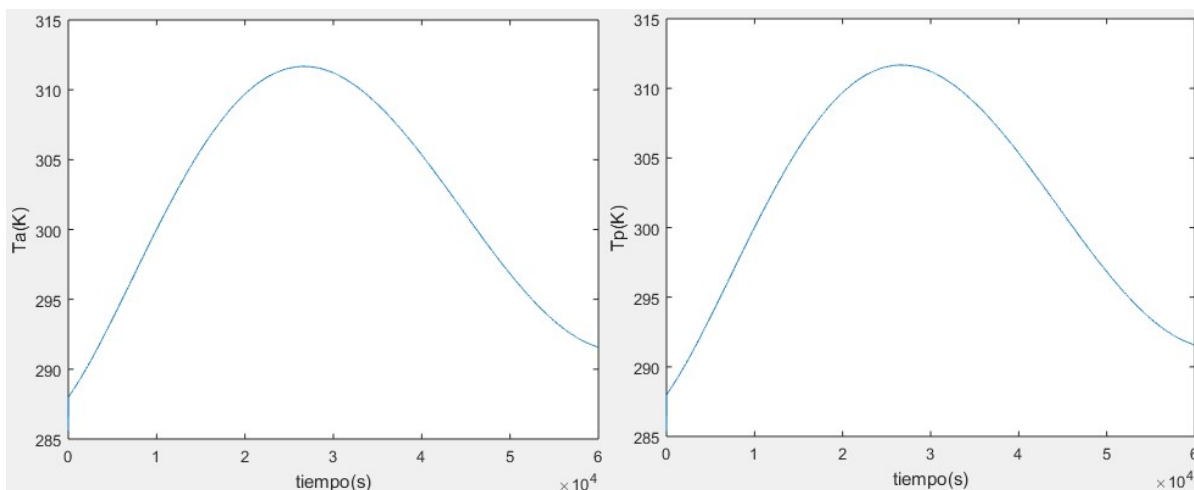
Ratio de Humedad del lecho de algas,  $MR$



Gráfica 20. Humedad MR del alga vs tiempo caso I

*Hay un descenso más rápido de la humedad entre las 10 y las 3 de la tarde, periodo en el que la Toutcolector es más elevada. Vemos que las microalgas se secan por completo antes de anochecer, sobre las 6-7 de la tarde.*

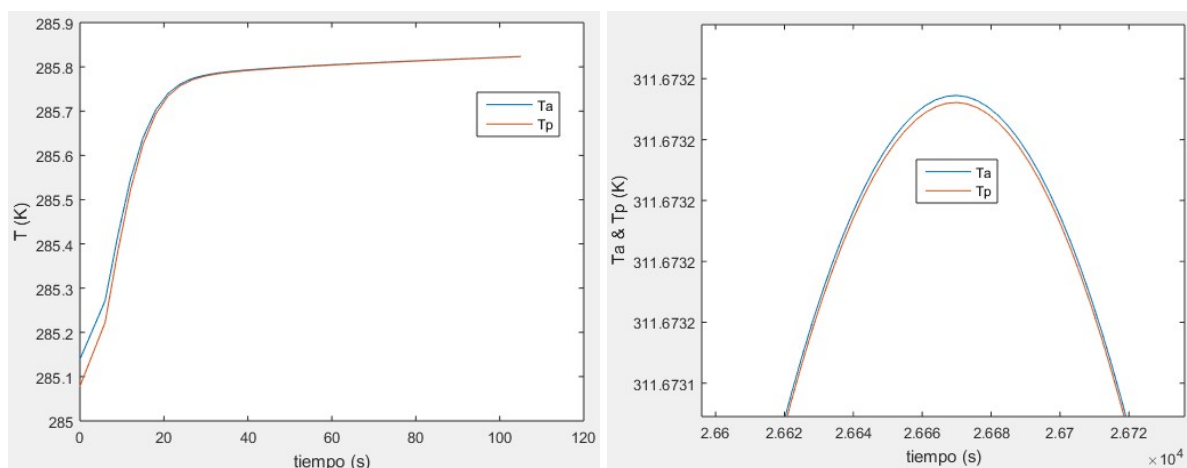
Temperatura del aire y del alga a la salida del túnel de secado,  $T_a$  y  $T_p$



*Izquierda Gráfica 21. Temperatura del aire  $T_a$  vs tiempo caso I*

*Derecha Gráfica 22. Temperatura del alga  $T_p$  vs tiempo caso I*

*prácticamente ambas temperaturas son iguales, comienzan en torno a los 14°C, como la Toutcolector, y a medida que el aire del colector llega más caliente, las temperaturas del aire de secado y de las algas se elevan, hasta llegar a los 40°C aproximadamente. Sin embargo, hay un detalle que sólo podemos apreciar si analizamos en un intervalo mucho más pequeño, como se explica en la siguiente gráfica*



*Gráfica 23. Detalle instantes iniciales, diferencia entre  $T_a$  y  $T_p$  vs tiempo caso I*

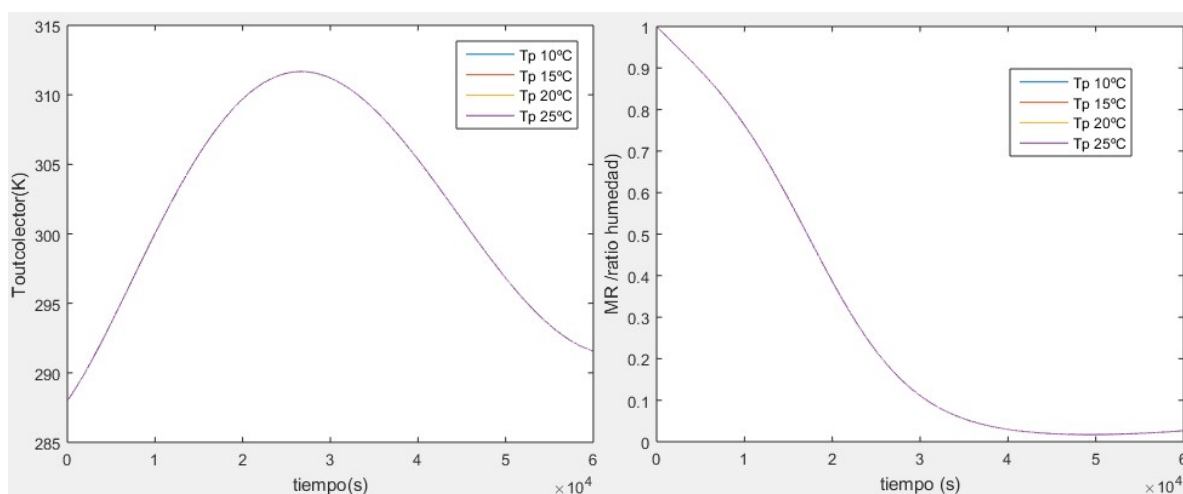
*Vemos que en el primer minuto aproximadamente, la temperatura del alga es ligeramente inferior a la del aire de secado. En pocos segundos dicha temperatura sube hasta casi igualar la temperatura del aire, pero siempre es ligeramente inferior a ésta porque parte de la energía(calor) se usa par evaporar el agua.*

CASO 1.1 CAMBIO EN LA  $T_p$  INICIALLecho de algas

Temperatura inicial del lecho de microalgas húmedas  $T_p = 10, 15, 20, 25^\circ\text{C}$   
 vamos a ver cómo afecta a las gráficas obtenidas la variación de la  
 temperatura inicial del lecho de algas  $T_p$

*mismas condiciones en el resto de variables*

Temperatura del aire a la salida del colector  $T_{outcolector}$  y humedad del alga  $MR$



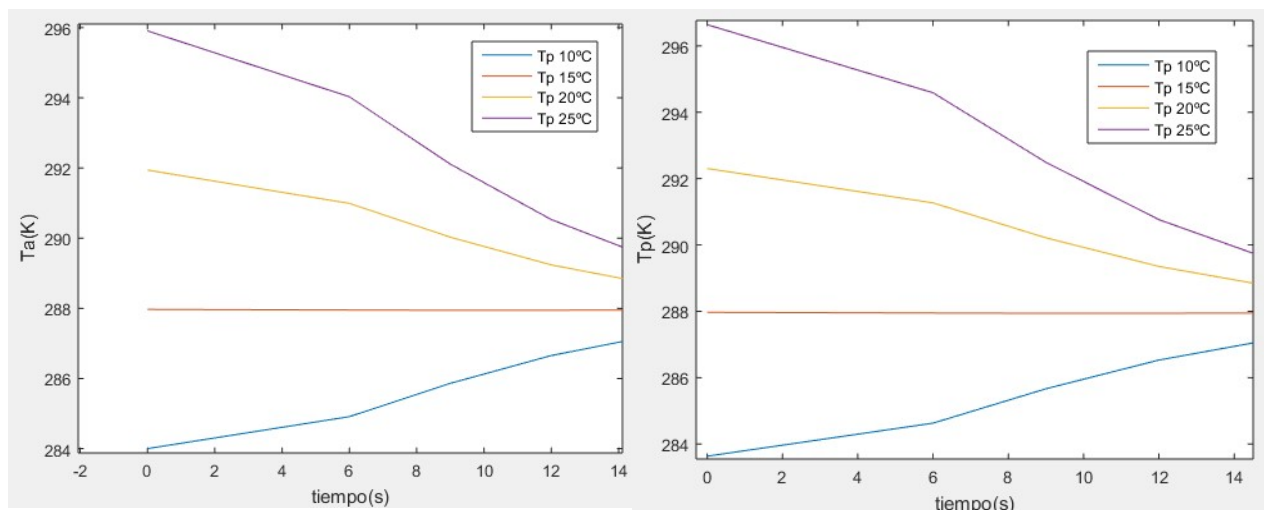
Izquierda Gráfica 24.  $T_{outcolector}$  vs tiempo caso 1.1

Derecha Gráfica 25. Humedad  $MR$  vs tiempo caso 1.1

*Se obtienen valores idénticos al caso anterior en el que  $T_p$  inicial era  $12^\circ\text{C}$ , tanto para la  $T_{outcolector}$  como para la humedad  $MR$ . Por lo tanto en éstas variables el efecto de cambiar la temperatura inicial del lecho de algas  $T_p$  no produce ningún cambio destacable. Esto se debe a que en el desarrollo de las ecuaciones, la temperatura del lecho de algas no aparece en el cálculo ni de la  $T_{outcolector}$  ni de la humedad  $MR$ .*

Temperatura del aire y del alga a la salida del túnel de secado,  $T_a$  y  $T_p$

*En los instantes iniciales (durante el primer medio minuto aproximadamente) podremos observar que las temperaturas tanto del aire como del alga comienzan desde valores diferentes, según la  $T$  inicial del producto  $T_p$  que demos. A continuación mostramos lo ocurrido:*



Izquierda Gráfica 26. Detalle instantes iniciales  $T_a$  vs tiempo caso 1.1

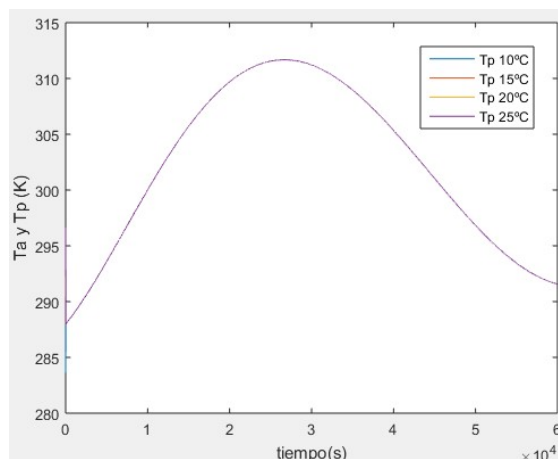
Derecha Gráfica 27. Detalle instantes iniciales  $T_p$  vs tiempo caso 1.1

los valores exactos obtenidos en el instante inicial para ambas temperaturas son:

$T_p=10^\circ\text{C}$	$T_a(1)=284^\circ\text{C}$	$T_p(1)=283.6^\circ\text{C}$
$T_p=15^\circ\text{C}$	$T_a(1)=287.97^\circ\text{C}$	$T_p(1)=287.96^\circ\text{C}$
$T_p=20^\circ\text{C}$	$T_a(1)=291.94^\circ\text{C}$	$T_p(1)=292.3^\circ\text{C}$
$T_p=25^\circ\text{C}$	$T_a(1)=295.9^\circ\text{C}$	$T_p(1)=296.64^\circ\text{C}$

*el rango de variación de las temperaturas iniciales es prácticamente el mismo para  $T_a$  y  $T_p$ , sin embargo la temperatura del lecho de algas  $T_p$  tiene valores ligeramente inferiores que  $T_a$  para temperaturas de algas inicialmente bajas.*

*Si nos fijamos en todo el intervalo de tiempo (del orden de  $6 \cdot 10^4$  segundos), las gráficas que se obtienen de la temperatura del aire y del producto(algas) son las mismas que las obtenidas para el caso 1.*



Gráfica 28.  $T_a$  y  $T_p$  vs tiempo caso 1.1



## CASO 2 GRÁFICAS PARA $T_p$ 20°C

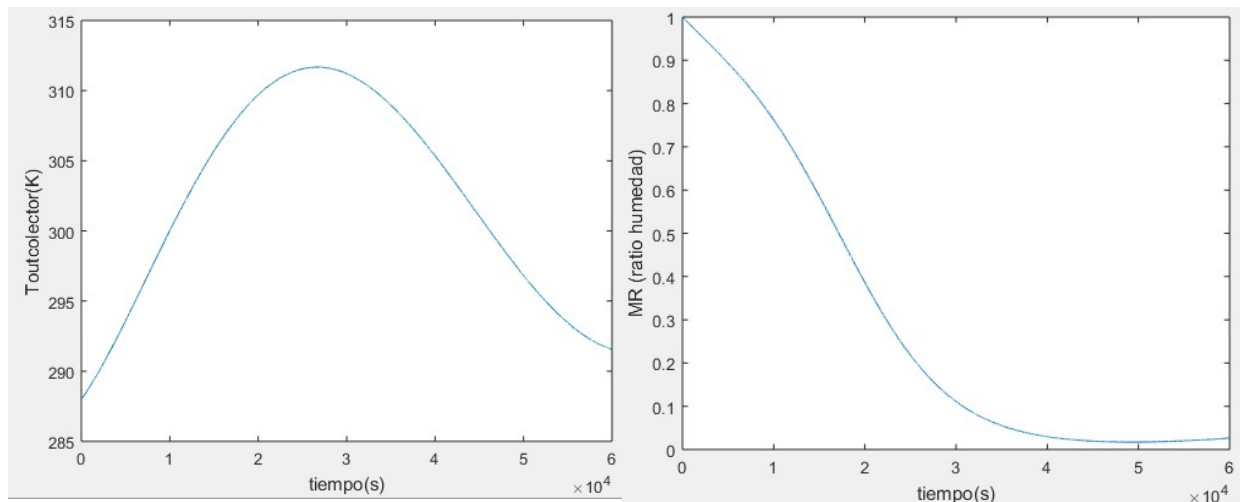
Condiciones iniciales

Lecho de algas

Temperatura inicial del lecho de microalgas húmedas  $T_p = 20^\circ\text{C}$

***Mantenemos igual el resto de variables***

Temperatura del aire a la salida del colector  $T_{outcolector}$  y humedad del alga  $MR$

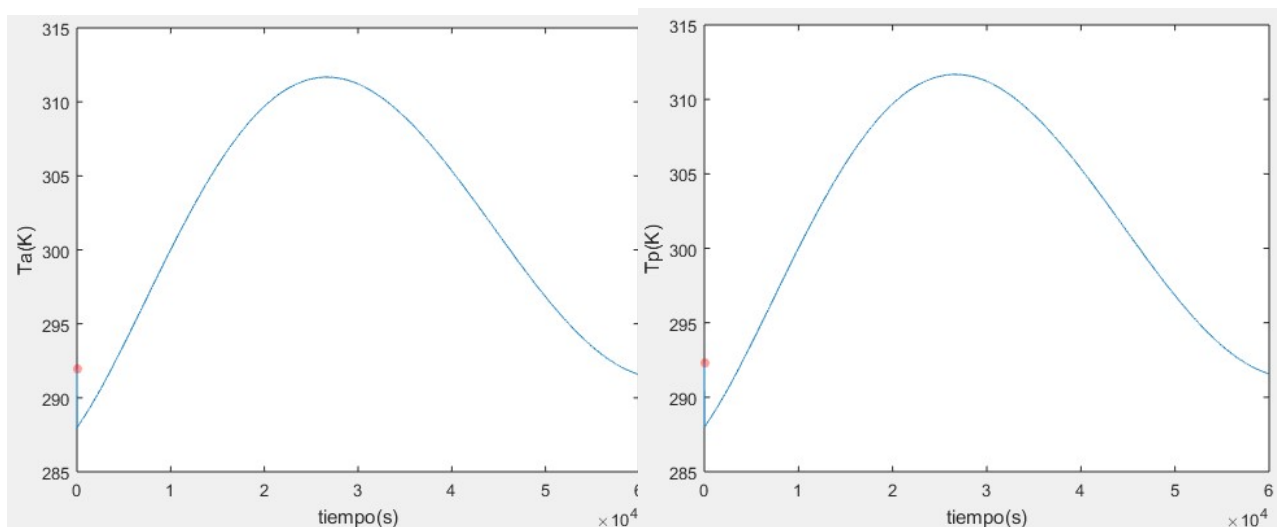


*Izquierda Gráfica 29.  $T_{outcolector}$  vs tiempo caso2*

*Derecha Gráfica 30. Humedad  $MR$  vs tiempo caso2*

***Se obtienen las mismas gráficas que cuando  $T_p$  inicial vale  $12^\circ\text{C}$ , tanto para la  $T_{outcolector}$  como para la humedad  $MR$ . Como ya vimos en el caso anterior, el valor de la  $T$  inicial del producto no afecta al cálculo de la  $T_{outcolector}$  ni de la humedad.***

Temperatura del aire y del alga a la salida del túnel de secado,  $T_a$  y  $T_p$



*Izquierda Gráfica 31. Temperatura del aire  $T_a$  vs tiempo caso2*

*Derecha Gráfica 32. Temperatura del alga  $T_p$  vs tiempo caso2*

*Las gráficas en general son las mismas que sacábamos con  $T_p 12^\circ\text{C}$  con la diferencia que las temperaturas iniciales del aire a la salida del túnel de secado  $T_a$ , y de la temperatura del alga tras el proceso son diferentes,  $T_a(1)=291.94^\circ\text{C}$  mientras que  $T_p(1)=292.3^\circ\text{C}$ . Además, ahora se produce un descenso súbito de ambas temperaturas y después un comportamiento muy similar al observado con  $T_p 12^\circ\text{C}$ .*

*Éste descenso tan brusco de las temperaturas ocurre porque la derivada, que establece la velocidad de secado, tiene un valor muy alto, lo que implica que se evapora mucha agua y requiere mucha energía y por lo tanto la extrae de la temperatura tanto del aire  $T_a$  como de las algas  $T_p$ .*

### CASO 3

#### VARIACIÓN EN LA TOMA INICIAL DE DATOS

Lecho de algas

Temperatura inicial del lecho de microalgas húmedas  $T_p = 15^\circ\text{C}$

Colector Solar de aire

$T_{amb}(i)$ : temperaturas importadas de 1 día de junio, desde las 7AM, 8AM, 9AM Y 10A

$I(i)$ : irradiaciones importadas de 1 día de junio, desde las 7AM, 8AM, 9AM Y 10AM

*Es decir, si cogemos los valores de horas más avanzadas en el día, la  $T_{ambiente}$  de entrada al colector y la irradiación solar  $I$  serán mayores, en el código lo programamos así:*

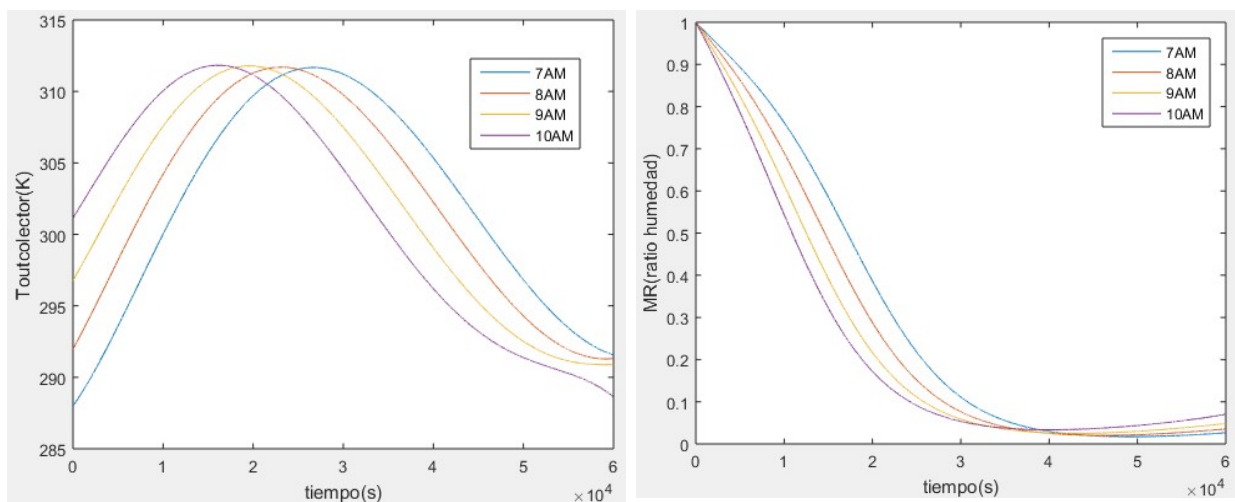
```
Tcolector=Tout(7,8,9,10:24);
timecol=timesec(7,8,9,10:24)-timesec(7,8,9,10);
```

Tiempo e instantes

instantes  $p = 20000$

resto de variables iguales

Temperatura del aire a la salida del colector  $T_{outcolector}$  y humedad del alga  $MR$



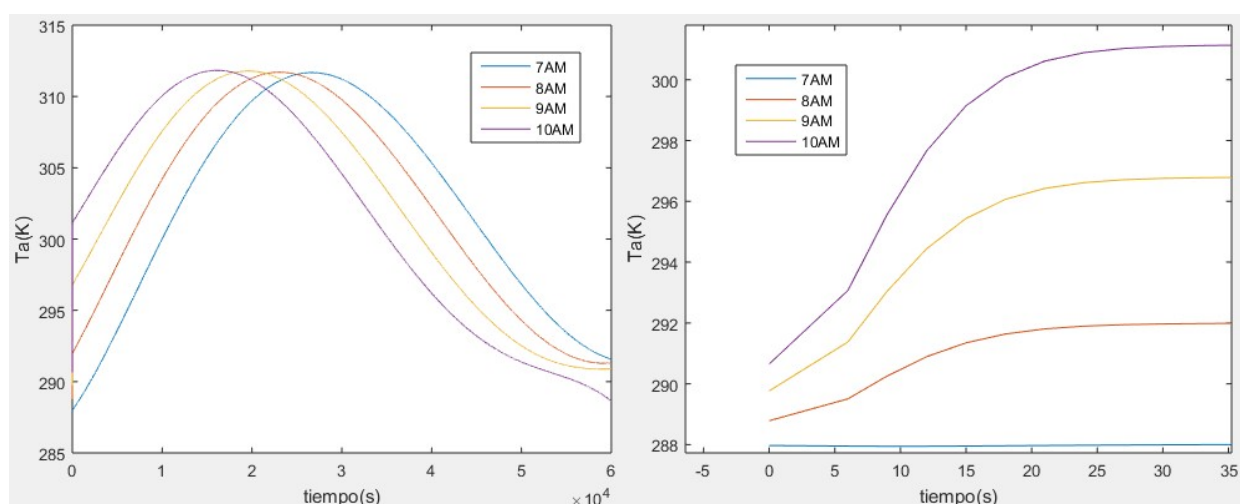
Izquierda Gráfica 33.  $T_{outcolector}$  vs tiempo caso3

Derecha Gráfica 34. Humedad  $MR$  vs tiempo caso3

*Respecto a la  $T$  a la salida del colector, se aprecia claramente que las curvas tienen el mismo comportamiento pero están desfasadas un intervalo de tiempo. A medida que los datos de entrada tomados son más altos (9 y 10AM) la Toutcolector comienza en valores más elevados y llega antes a la su  $T_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente  $40^{\circ}\text{C}$ .*

*Éste hecho afecta directamente a la gráfica de la humedad mostrada a la derecha. Todos los valores empiezan en 1 pues así se establece, pero luego el comportamiento de las curvas es diferente según sea la Toutcolector: para un mismo instante de tiempo, la Toutcolector es más elevada cuando los datos son tomados entre las 9-10AM que si los cogemos a las 7-8AM, esto produce que la humedad se reduzca antes en dichos casos, pues la  $T$  que entra en la cámara de secado es la que sale del colector, y es más elevada en instantes de tiempo más tempranos.*

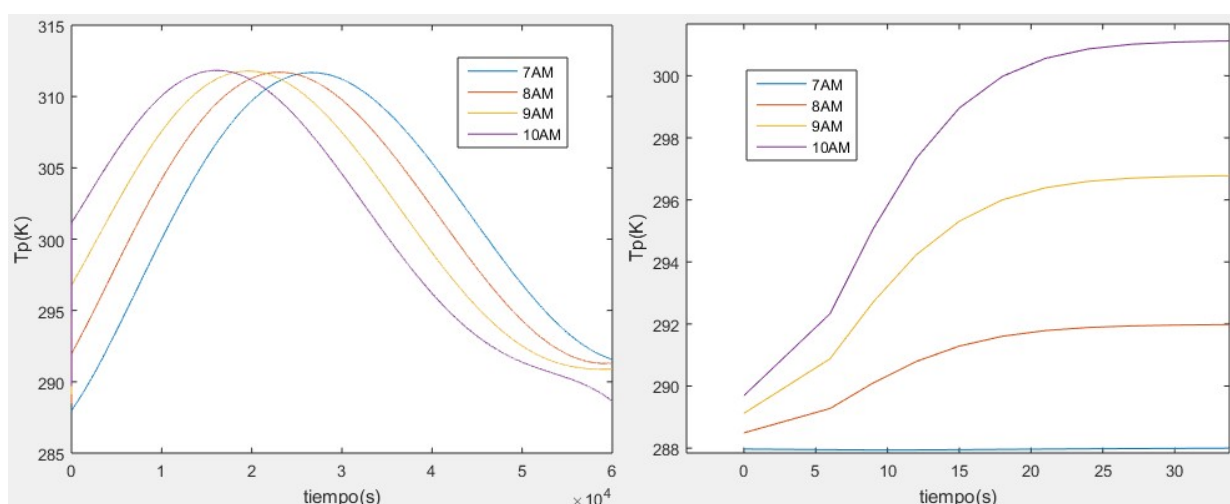
Temperatura del aire a la salida del túnel de secado,  $T_a$



*Izquierda Gráfica 35. Temperatura del aire  $T_a$  vs tiempo caso3*

*Derecha Gráfica 36. Detalle instantes iniciales Temperatura del aire  $T_a$  vs tiempo caso3*

Temperatura del alga a la salida del túnel de secado,  $T_p$

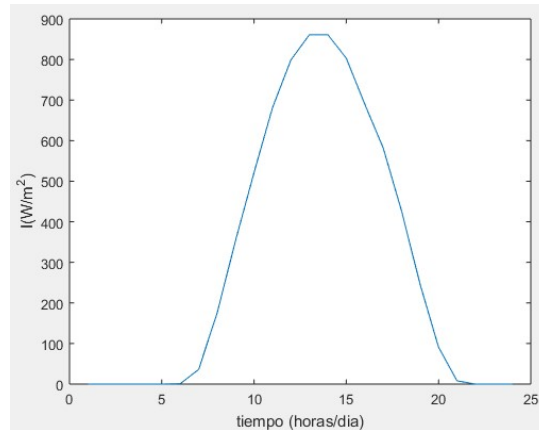


*Izquierda Gráfica 37. Temperatura del alga  $T_p$  vs tiempo caso3*

*Derecha Gráfica 38. Detalle instantes iniciales Temperatura del alga  $T_p$  vs tiempo caso3*

*Para intervalos de tiempo grandes, los comportamientos de ambas temperaturas son similares, siempre teniendo el desfase de tiempo del que hablábamos antes.*

*Lo más interesante es fijarse en los segundos iniciales, donde  $T_p$  resulta ser algo menor que la temperatura del aire de secado  $T_a$ . En éstos segundos se produce un incremento muy rápido de las temperaturas  $T_a$  y  $T_p$  para los casos en que entramos con datos desde las 8-9 y 10AM donde la  $T_{ambiente}$  comienza a ser superior a la  $T$  inicial establecida en el lecho de algas ( $15^\circ\text{C}$ ). Si nos fijamos, la  $T_{ambiente}$  para horas posteriores a las 8AM es de 16-17 grados en adelante. Éste aumento rápido de entre  $8-10^\circ\text{C}$  ocurre porque para las horas más avanzadas en el día (9 y 10AM) la irradiación solar comienza a ser mucho más elevada, y tiene un crecimiento más exponencial; si retomamos la gráfica de la irradiación se puede apreciar claramente lo que comentábamos:*



Gráfica 39. irradiación media ( $\text{W/m}^2$ ) vs horas del día

#### CASO 4 LONGITUD DEL LECHO DE ALGAS

Lecho de algas

*longitud bandeja microalgas  $\Delta x = 1, 2, 3, 4\text{m}$*

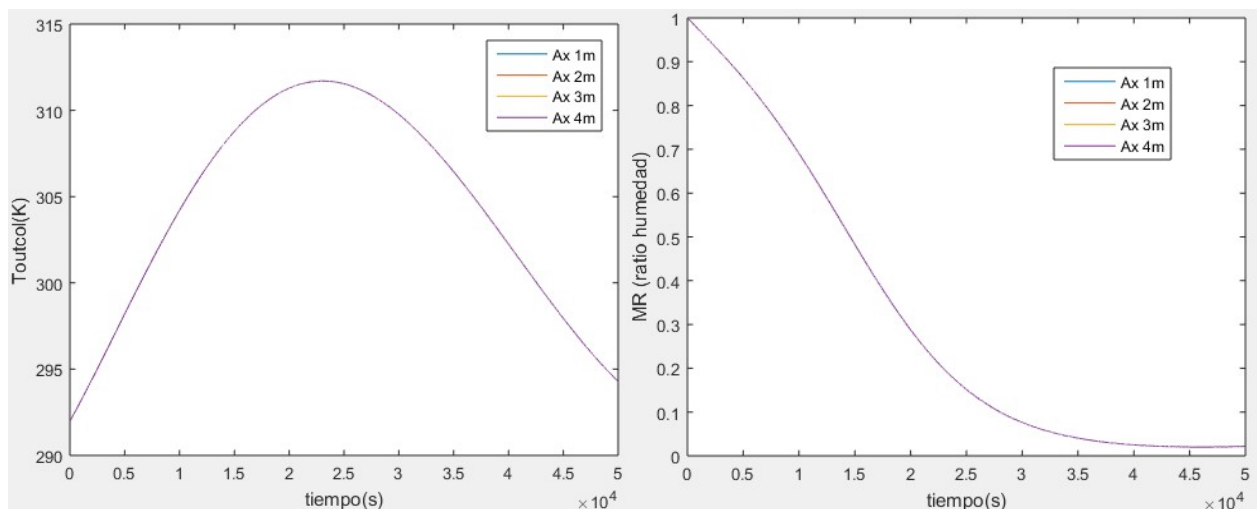
*temperaturas e irradiaciones importadas desde las 8AM*

Tiempo e instantes

*instantes  $p = 16666$*

**resto de variables iguales**

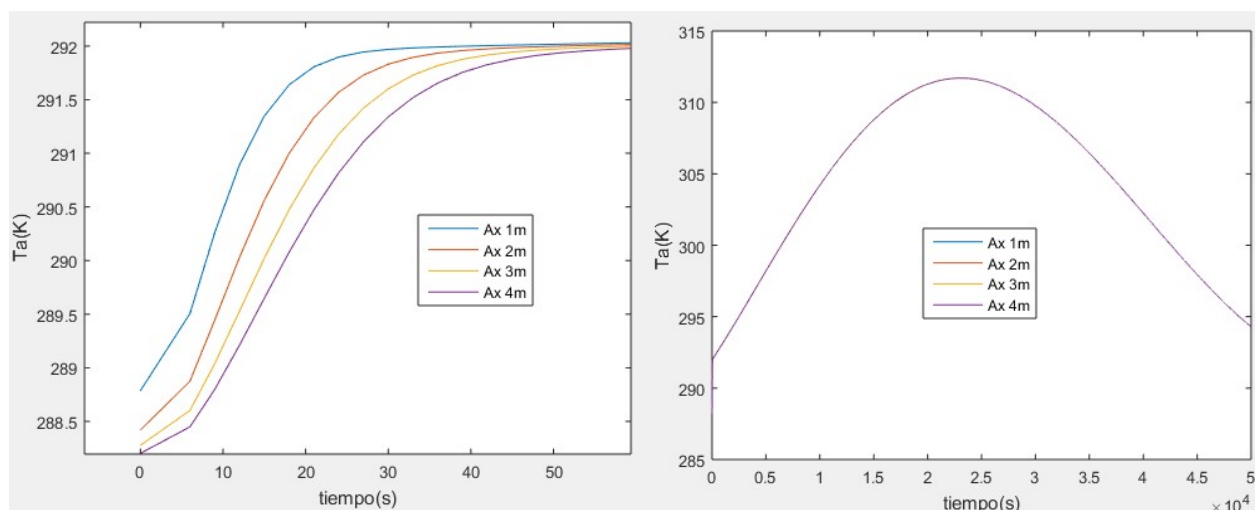
Temperatura del aire a la salida del colector  $T_{outcolector}$  y humedad del alga  $MR$



*Izquierda Gráfica 40.  $T_{outcolector}$  vs tiempo caso4*

*Derecha Gráfica 41. Humedad  $MR$  vs tiempo caso4*

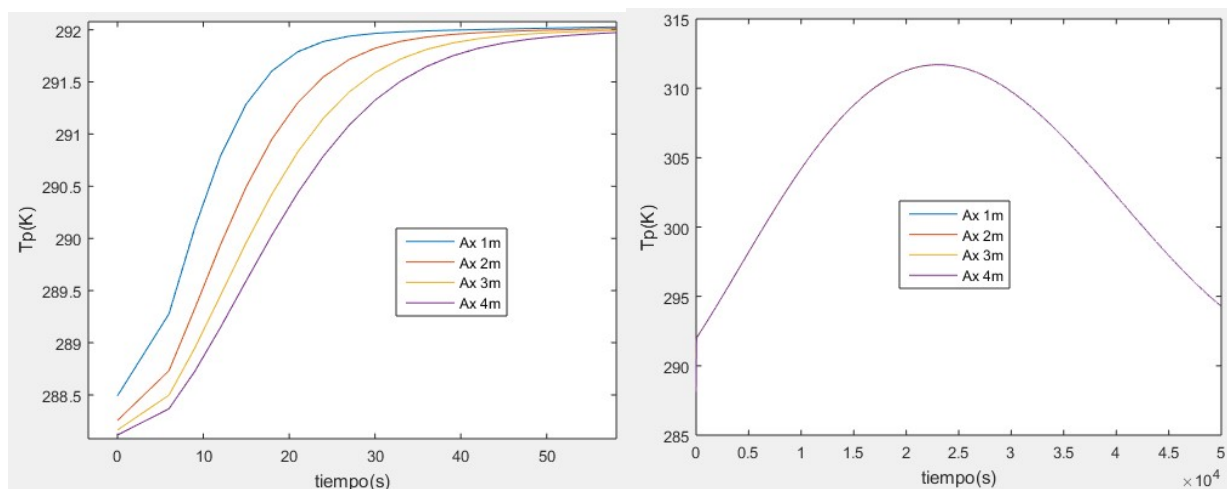
Temperatura del aire a la salida del túnel de secado,  $T_a$



Izquierda Gráfica 42. Detalle instantes iniciales Temperatura del aire  $T_a$  vs tiempo caso4

Derecha Gráfica 43. Temperatura del aire  $T_a$  vs tiempo caso4

Temperatura del alga a la salida del túnel de secado,  $T_p$



Izquierda Gráfica 44. Detalle instantes iniciales Temperatura del alga  $T_p$  vs tiempo caso4

Derecha Gráfica 45. Temperatura del alga  $T_p$  vs tiempo caso4

Las temperaturas en el aire de secado a la salida del túnel y la temperatura en el lecho de algas son prácticamente las mismas con las distintas longitudes, únicamente vemos cambios, y muy pequeños, en los primeros 30 segundos: se produce un aumento rápido de ambas temperaturas (desde 288 a 292°C) y los valores iniciales de ambas  $T$ 's, son menores (pero apenas se aprecia) cuanto más larga es la bandeja de algas.

(\*)A simple vista las curvas de secado de éste caso se comportan igual para longitudes de bandeja diferentes. Es raro que al aumentar la longitud considerada no cambie la curva de secado. Esto se debe a las hipótesis tomadas, pues estamos suponiendo que en todo el 'batch' o bandeja ocurre lo mismo (no hemos discretizado en el dominio del espacio). A la vista del

*resultado, pondríamos una bandeja infinita y se secaría igual que una pequeña, hecho que es físicamente imposible, por lo que concluiremos que la simulación para variaciones a lo largo de la longitud de la bandeja no es fiel a lo que ocurriría en la realidad.*

## CASO 5 NÚMERO DE BANDEJAS DE MICROALGAS

Lecho de algas

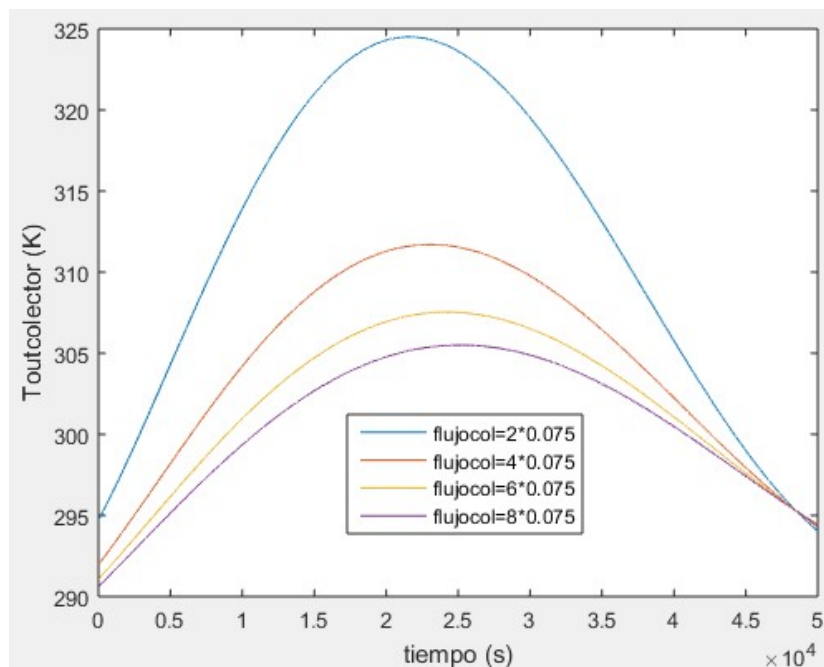
longitud bandeja microalgas  $\Delta x = 1\text{m}$

número de bandejas de microalgas en la cámara de secado  $n = 2, 4, 6 \text{ y } 8$

flujo másico aire en entrada colector  $\dot{m}_{\text{airecolector}} = n * \dot{m}_{\text{aire}}(\text{kg/s})$

resto de variables iguales

Temperatura del aire a la salida del colector  $T_{\text{outcolector}}$



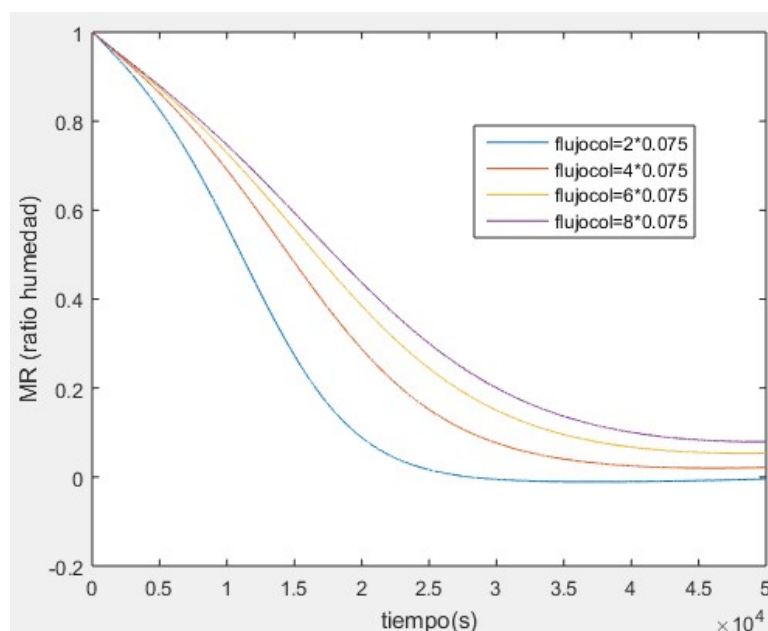
Gráfica 46.  $T_{\text{outcolector}}$  según  $\dot{m}_{\text{airecolector}}$  a lo largo del tiempo caso5

*En ésta gráfica se ve el efecto que tiene el nº de bandejas a colocar en paralelo en el secador sobre la temperatura del aire a la salida del colector solar. A medida que el número de bandejas aumenta, el flujo de aire necesario a la entrada del colector debe subir forzosamente, y la temperatura del aire a la salida del colector, para los mismos instantes de tiempo, va a ir disminuyendo. Por ejemplo, para 2 bandejas en paralelo, tenemos un flujo a la entrada de 0.15 kg/s, la  $T_{\text{outcolector}}$  alcanza valores de unos 52°C en las horas de mediodía, mientras que si colocamos 8 bandejas, entran 0.6 kg/s y la  $T_{\text{outcolector}}$  alcanza apenas los 32°C.*

*Éste hecho se debe a que cuanto más rápido circula el aire dentro del colector (más flujo másico y por tanto más bandejas), el tiempo de residencia de ése aire dentro del colector es menor, por lo que no tiene tiempo para calentarse tanto como un aire que entra a menos flujo.*



### Curva de la Humedad del alga $MR$



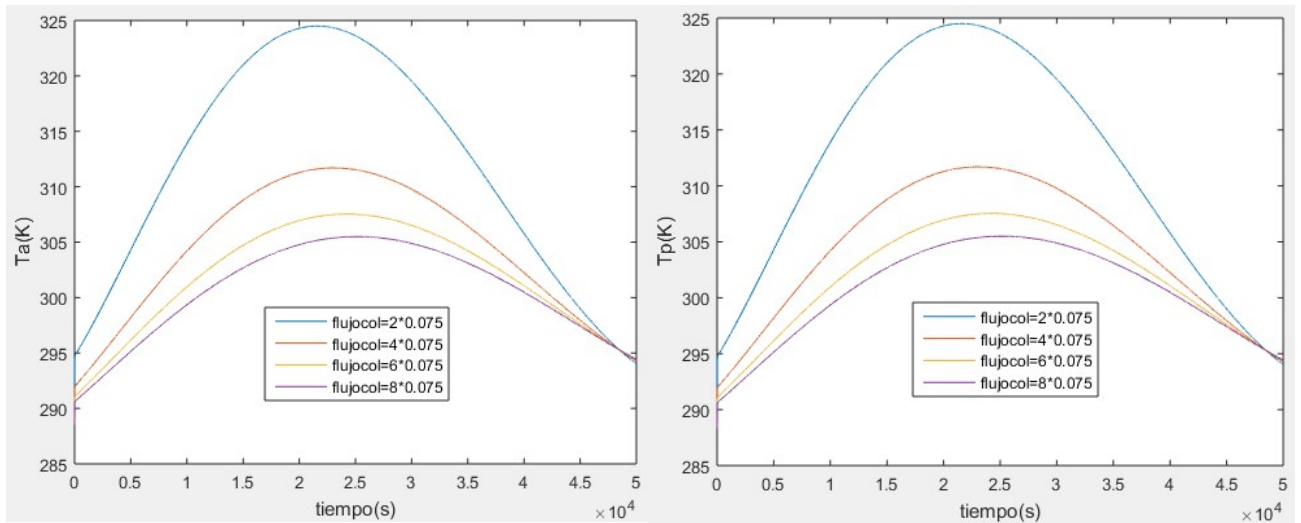
Gráfica 47. Humedad  $MR$  lecho algas a lo largo del tiempo, según  $\dot{m}_{airecolector}$  caso 5

*El flujo de aire a la entrada del colector afecta al contenido de agua existente en la capa de microalgas de manera que cuanto menor es el flujo de aire, la humedad decrece más rápido que cuando los flujos son más altos.*

*Puesto que en éste caso el flujo de aire a la entrada de la cámara de secado es constante  $\dot{m}_{aire} = 0.075 \text{ kg/s}$  para cada bandeja de microalgas, la humedad de la ó las capas de microalgas depende directamente de la temperatura del aire que entra al túnel de secado, que es el mismo aire que sale del colector, por lo que depende directamente de la Toutcolector. Como hemos visto en la anterior gráfica, a menos flujo de entrada en el colector, el aire entra a la cámara de secado más caliente que si el flujo es elevado, por lo que la humedad se reducirá más rápidamente con temperaturas elevadas, las cuales sólo se consiguen con flujos bajos de aire a la entrada del colector, lo que conlleva a un número reducido de bandejas de algas.*

*Podemos decir que para flujos constantes de aire por bandeja, cuantas menos bandejas queramos colocar, más rápido se nos secará el alga. Sin embargo, si queremos colocar muchas bandejas en paralelo, necesitaremos meter mucho más flujo de aire en el colector, no se calentará tanto dicho aire y por tanto el alga se secará más lentamente.*

Temperatura del aire y del alga a la salida del túnel de secado,  $T_a$  y  $T_p$



Izquierda Gráfica 48. Temperatura del aire  $T_a$  vs tiempo caso5

Derecha Gráfica 49. Temperatura del alga  $T_p$  vs tiempo caso5

Las curvas  $T_a$  y  $T_p$  se comportan de manera muy similar y tienen el mismo patrón que la  $T_{outcolector}$ , de forma que cuantas menos bandejas a colocar menor será el flujo de aire necesario a la entrada del colector y mayor será la  $T_{outcolector}$  y por consecuencia la temperatura del aire para secar las algas, por lo que a lo largo del tiempo, la temperatura a la salida tanto del aire de secado como del lecho de algas serán más altas cuanto menos bandejas coloquemos en paralelo, y más bajas cuanto más aire, es decir más bandejas se coloquen en la cámara de secado

### CASO 6 CAMBIOS EN EL FLUJO MÁSICO DE AIRE POR CADA BANDEJA DE MICROALGAS

Lecho de algas

longitud bandeja microalgas  $\Delta x = 1m$

flujo másico aire en cada bandeja  $\dot{m}_{aire} = 0.055; 0.075; 0.095; 0.115 \text{ kg/s}$

número de bandejas de microalgas en la cámara de secado  $n = 4$

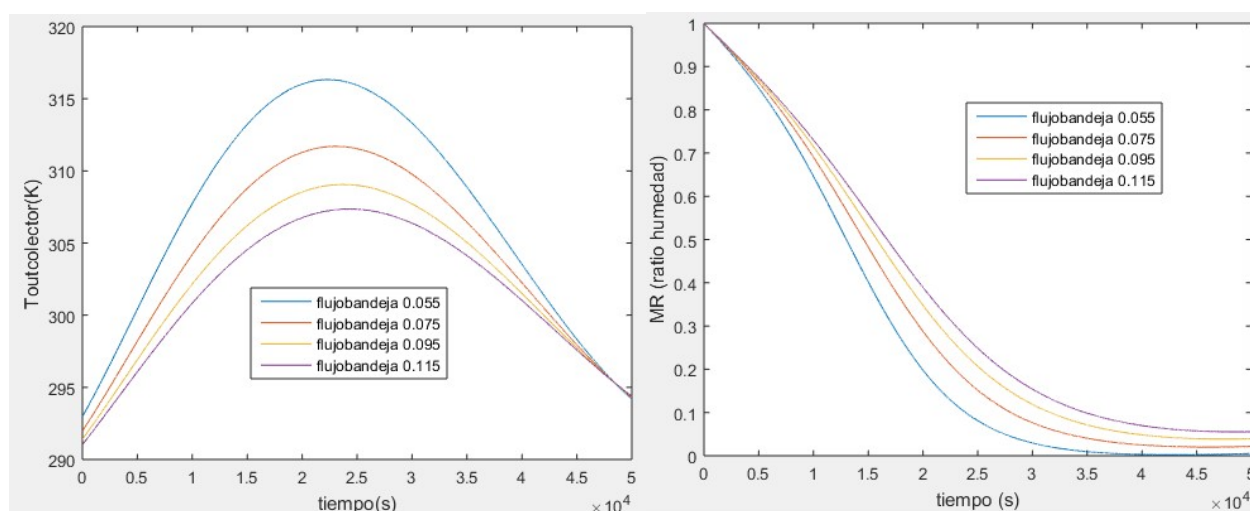
flujo másico aire en entrada colector  $\dot{m}_{airecolector} = 4 * \dot{m}_{aire} (\text{kg/s})$

Ahora no sólo varía el flujo a la entrada del colector, sino que también varía el flujo a la entrada de las bandejas de la cámara de secado, lo que ocurre que en éste caso siempre tendremos el mismo número de bandejas

resto de variables iguales



### Temperatura del aire a la salida del colector $T_{outcolector}$ y humedad del alga $MR$



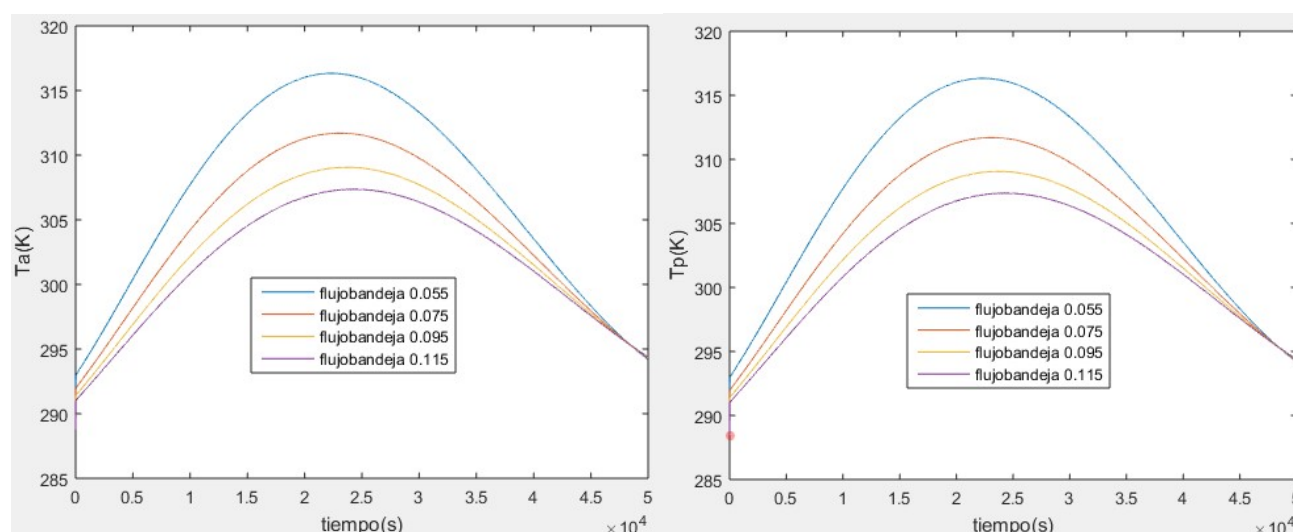
Izquierda Gráfica 50.  $T_{outcolector}$  vs tiempo caso6

Derecha Gráfica 51. Humedad  $MR$  vs tiempo caso6

Los comportamientos de las curvas que se reflejan arriba se asemejan mucho a los del caso anterior 2.2. En el caso de la  $T_{outcolector}$ , el flujo a la entrada del colector será menor si fijamos flujos bajos para las bandejas, y por lo tanto el aire se calentará durante más tiempo que si entra con flujos altos. Por ejemplo, para un flujo de  $0.055 \text{ kg/s}$  en la bandeja, necesitaremos un flujo a la entrada del colector de  $0.22 \text{ kg/s}$ , que es mayor que el flujo más bajo del caso anterior, por eso la  $T_{outcolector}$  de éste caso es menor, pues el aire circula más rápido y no le da tiempo a calentarse tanto.

Un efecto similar ocurre en la humedad  $MR$  del producto. Al efecto del flujo por bandeja se le suma el efecto de la temperatura del aire a la entrada de la cámara de secado, que viene determinado por el flujo a la entrada del colector como hemos visto ahora mismo. La humedad se reduce más lentamente que en el caso anterior principalmente porque el aire de secado entra a menor temperatura que antes, por lo que el aire elimina más lentamente el agua de la capa de algas.

### Temperatura del aire y del alga a la salida del túnel de secado, $T_a$ y $T_p$



Izquierda Gráfica 52. Temperatura del aire  $T_a$  vs tiempo caso6

*Derecha Gráfica 53. Temperatura del alga  $T_p$  vs tiempo caso6*

*Como es lógico se obtienen unas curvas  $T_a$  y  $T_p$  muy similares al caso 2.2 pues se trata también de variaciones de flujo y tienen el mismo patrón que la curva de  $T_{outcolector}$  con el tiempo. La temperatura a la salida tanto del aire de secado como del lecho de algas serán más altas cuanto menos flujo por bandeja elijamos, y más bajas cuanto más aire, es decir más flujo entre en la cámara de secado*

### CASO 7 CAMBIOS EN LA ALTURA $H$ DE LA CÁMARA DE SECADO

Lecho de algas

longitud bandeja microalgas  $\Delta x = 1\text{m}$

flujo másico aire en entrada colector  $\dot{m}_{airecolector} = 4 * \dot{m}_{aire}(\text{kg/s})$

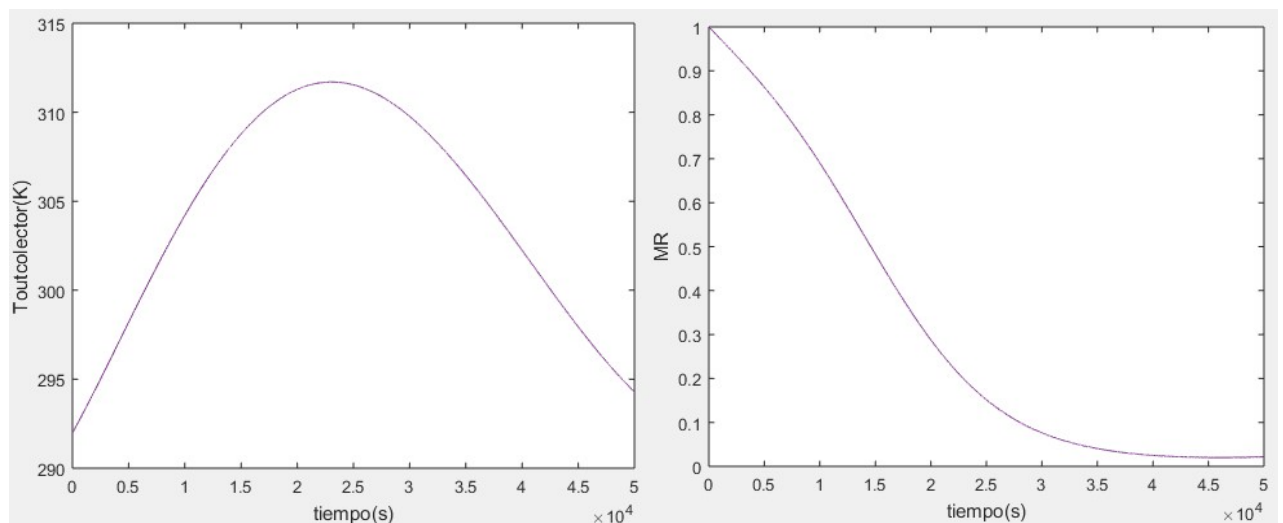
Cámara/túnel de secado

Altura  $H$  de la cámara de secado=3,5,7,9 cm

*Ahora sólo cambiamos la altura  $H$  de la cámara de secado, considerando dicha altura para cada bandeja de algas, es decir, si tenemos 2 bandejas tendremos 2 alturas  $H$ .*

*resto de variables iguales*

Temperatura del aire a la salida del colector  $T_{outcolector}$  y humedad del alga  $MR$

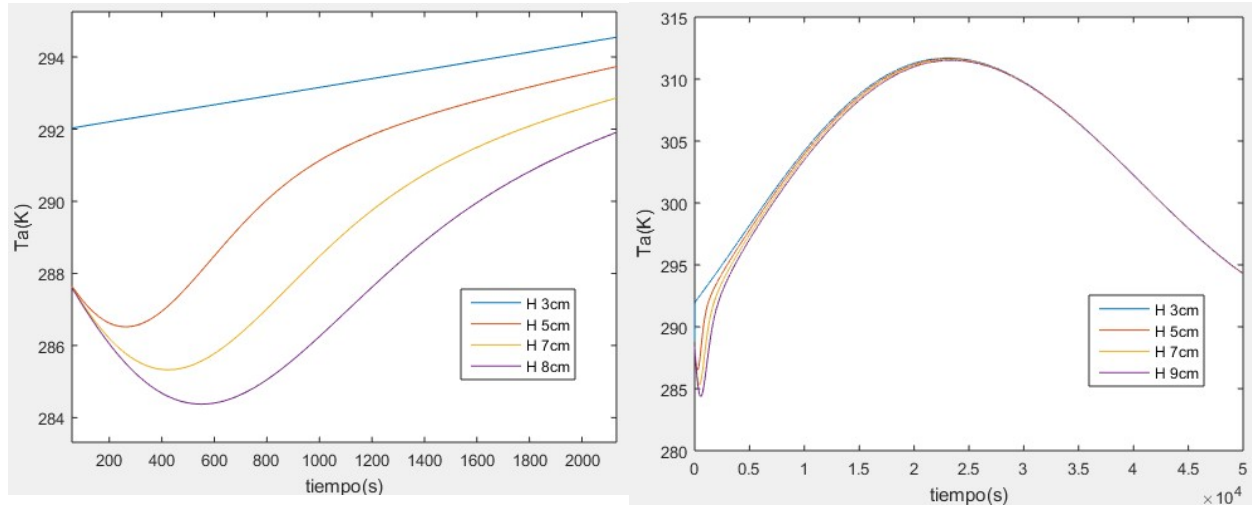


*Izquierda Gráfica 54.  $T_{outcolector}$  vs tiempo caso7*

*Derecha Gráfica 55. Humedad  $MR$  vs tiempo caso7*

*Ni la  $T_{outcolector}$  ni la humedad  $MR$  parece que sufran algún tipo de variación si aumentamos la altura  $H$  del túnel de secado*

Temperatura del aire de secado, a la salida del túnel,  $T_a$

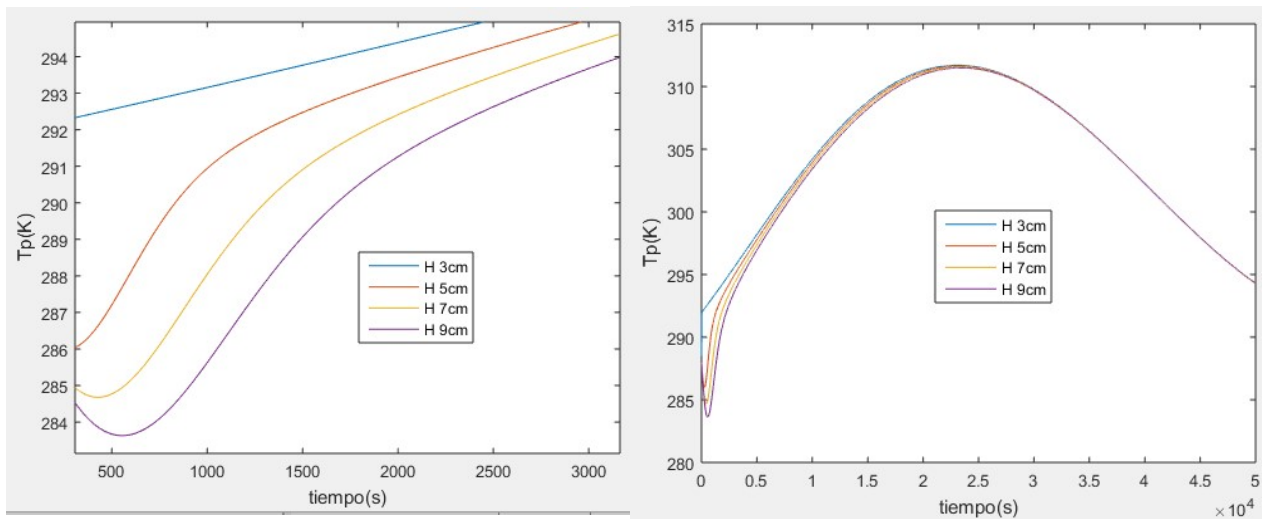


Izquierda: Gráfica 56. Detalle  $T_a$  vs tiempo en instantes iniciales caso7

Derecha: Gráfica 57. Variación  $T_a$  a lo largo del  $t$  caso7

Los efectos del aumento de la altura  $H$  se aprecian mejor en la gráfica de la izquierda, cuando reducimos el intervalo de tiempo para estudiar qué ocurre en los instantes de tiempo iniciales. Podemos observar que para un caudal constante de aire, como hay más altura de túnel, el aire pasa más despacio, sin embargo al principio del secado la derivada (velocidad de secado) es más alta, lo que fuerza a que se seque de forma más rápida y caiga la temperatura. En cambio, cuando reducimos la altura, disminuimos el área de paso del aire, por lo que el aire circulará más rápido y se llevará más agua sin necesidad de perder temperatura..

Temperatura del producto (microalgas) a la salida del túnel,  $T_p$



Izquierda: Gráfica 58. Detalle  $T_p$  vs tiempo en instantes iniciales caso7

Derecha: Gráfica 59. Variación  $T_p$  a lo largo del  $t$  caso7

Lo mismo ocurre con la temperatura del lecho de algas tras el secado, únicamente varían ligeramente los valores iniciales de  $T_p$

## 5.2 Estudio energético y económico

Con el fin de ver la viabilidad energética y económica que tiene éste caso práctico, vamos a realizar una serie de cálculos sencillos que nos permitirán hacernos una idea mejor de qué efectos positivos/negativos tiene montar una instalación como la propuesta en éste proyecto en cuanto a eficiencia energética y ahorro económico, pudiendo variar parte de las variables de entrada, como se ha hecho en los distintos casos del apartado anterior.

### ENERGÍA EN EL COLECTOR

Vamos a calcular toda la energía que aporta el colector solar de aire durante un tiempo de uso escogido por nosotros, para así poder calcular cuánto nos costaría conseguir dicha energía si pagamos electricidad.

Para cada hora del día, definiremos la energía aportada por el colector de la siguiente manera:

$$E_{colector}(i) = I(i) * hora * A_{colector} * \eta_{colector} \text{ (en Wh)}$$

Donde:

- el índice  $i$  señala el momento (hora) del día, irá de 1,2,3... en adelante
- $E_{colector}(i) \equiv$  energía que aporta el colector, en watios hora, Wh
- $I(i) \equiv$  irradiación solar incidente en cada hora  $i$  de un día típico, en  $\frac{W}{m^2}$
- rendimiento del colector  $\eta_{colector} = 75\% = 0.75$
- área del colector  $A_{colector} = 6 m^2$

Por lo que a cada hora del día, el colector aporta una cantidad de energía en concreto.

El siguiente código genera los valores de energía del colector, metiendo los datos de las irradiaciones solares del día de junio y los valores ya mencionados de rendimiento y área del colector.

```
%cargamos datos de la irradiaciones
%solares en un día típico
load('irradjunio.mat')
%rendimiento estándar de los
%colectores solares
rend=0.75;
%area del colector en metros cuadrados
Acolector=6;
Ecolector=zeros(24,1);
for i=1:24;
    Ecolector(i)=Ijunio(i)*Acolector*rend;
end
```

Ecolector cada hora del día

```
1.0e+03 *
0
0
0
0
0
0.00450000000000000
0.16200000000000000
0.78750000000000000
1.59300000000000000
2.34450000000000000
3.06450000000000000
3.59550000000000000
3.87450000000000000
3.87450000000000000
3.61350000000000000
3.10500000000000000
2.61900000000000000
1.91700000000000000
1.10700000000000000
0.40950000000000000
0.03600000000000000
0
0
0
```

Tabla 5. Energía aportada por el colector cada hora del día

## COSTE DE LA ENERGÍA APORTADA POR EL COLECTOR

Comenzaremos los cálculos fijando 1 día como unidad de tiempo alrededor de la cual haremos los cálculos.

Voy a suponer que el colector lo tenemos funcionando durante todo el día, de tal forma que la energía que aportará mi colector en total en 1 día será la suma de las energías que aporta cada hora:

$$E_{\text{colector}}(\text{día}) = E_{\text{colector}}(\text{hora 1}) + E_{\text{colector}}(\text{hora 2}) + \dots + E_{\text{colector}}(\text{hora 24})(*)$$

$$E_{\text{colector}} = 32107.50 \text{ Wh} = 32.10750 \text{ kWh al día}$$

(\*)podemos sumar todas las horas del día, pues aquellas en las que no hubiera radiación, se han contabilizado como 0, como podemos ver en la tabla anterior.

Una vez conocemos la energía que nuestro colector puede aportar en 1 día, podemos valorar el ahorro económico que el colector genera por día si dicha cantidad de energía la consiguiéramos con energía eléctrica, para ello debemos considerar un precio de electricidad:

Precio medio energía eléctrica: 0.13€ por kWh [41]

Si quisiéramos disponer de la energía que nos aporta el colector al día, para poder emplearla en calentar el aire y usarlo para secar las microalgas, nos costaría:

$$\text{Coste energético} = \text{precio electricidad} * E_{\text{colector}}(1\text{día})$$

$$\text{Coste energético} = 0.13 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 32.10750 \text{ kWh} = 4.173975 \text{ €} \approx 4.2 \text{ €/día}$$

Es decir, si queremos conseguir los aproximadamente 32 kWh/día que nos aporta el colector solar pagando la electricidad, deberíamos invertir 4.2€/día.

Éste coste lógicamente aumentará si el tiempo del que se quiere disponer de energía es más prolongado, por ejemplo:

Supongamos que el colector lo tenemos funcionando los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre, pues son los meses que normalmente más horas de sol tenemos y donde mejores valores de irradiación solar incidente pueden registrarse, por lo que es lógico que en ésa temporada del año tengamos el colector a pleno funcionamiento.

vamos a contabilizar 30 días de media por mes, recordemos que estamos haciendo una estimación del coste, por lo tanto

$$E_{\text{colector}}(\text{mes}) = 30 * E_{\text{colector}}(\text{día}) = 30 * 32.10750 \text{ kWh} = 963.225 \text{ kWh/mes}$$

\*suponemos que los 30 días tenemos unos datos similares de irradiación, pues los datos escogidos para el día típico eran datos medios.

Si usamos el colector solar de aire durante los meses mencionados antes, son un total de 6 meses entonces

$$E_{colector}(6 \text{ meses}) = 6 * E_{colector}(\text{mes}) = 6 * 963.225 \text{ kWh} = 5779.35 \text{ kWh}/6\text{meses}$$

Como se trata de una estimación, supondremos que los 6 meses se comportan de manera similar, aunque sabemos que la irradiación del mes de abril no es igual que la del mes de agosto. Si quisiéramos ser más exactos en los cálculos, deberíamos coger datos medios de irradiación para distintos meses de un año.

Una vez conocemos la energía que nuestro colector podría aportar en los 6 meses que se quiere usar, podemos calcular el coste económico que supondría disponer de dicha cantidad de energía eléctrica:

suponemos mismo precio medio del kWh

$$\text{Coste energético} = 0.13 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * E_{colector}(6 \text{ meses})$$

$$\text{Coste energético} = 0.13 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 5779.35 \frac{\text{kWh}}{6\text{meses}} = 751.3155 \text{€ en 6 meses}$$

a medida que tomamos valores de tiempo más grandes, el coste empieza a elevarse considerablemente.

si encima cogemos éste mismo planteamiento durante 5 años, es decir, usando el colector 6 meses al año durante 5 años, generaría

$$5779.35 \frac{\text{kWh}}{6\text{meses}} * 5 \text{ años} = 28896.75 \text{ kWh al cabo de 5 años}$$

supondría un coste de electricidad de

$$\text{Coste energético} = 0.13 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} * 28896.75 \text{ kWh} = 3756.5775 \text{€ en 5 años}$$

## COSTE DE LA INSTALACIÓN

Para poder hacer un presupuesto ajustado de la instalación, necesitamos tener en cuenta lo siguiente:

-precios de ventiladores en el mercado que den el caudal deseado, a la entrada del colector

$$\text{flujo másico de aire a la entrada } \dot{m}_{\text{airecolector}} = n * \dot{m}_{\text{aire}} = 4 * 0.075 = 0.3 \text{ kg/s}$$

Los ventiladores suelen dar sus caudales en  $\frac{m^3}{h}$ , para eso tengo que pasar mi caudal requerido a esas unidades

$$\dot{m}_{airecolector} = \dot{m}_{ventilador} = 0.3 \frac{kg}{s} * \frac{3600s}{hora} * \frac{1}{densidad\ aire}$$

*densidad aire seco a presión estándar* =  $1.29 kg/m^3$

$$\dot{m}_{ventilador} = 0.3 \frac{kg}{s} * \frac{3600s}{hora} * \frac{1}{1.29 kg/m^3} = 837.2093 m^3/hora$$

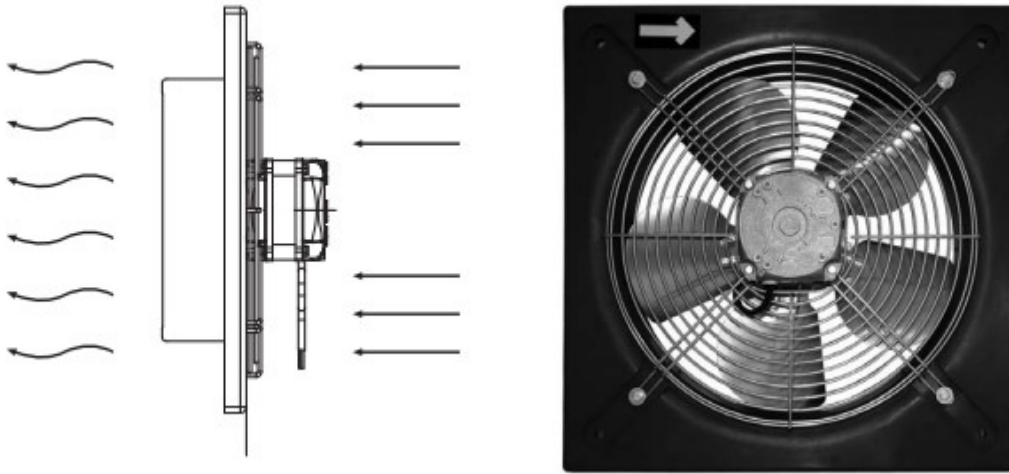


Figura 34. Detalle ventilador helicoidal

-El precio medio de un ventilador helicoidal que dé un caudal de  $1000 m^3/hora$  aproximadamente, y permita temperaturas del aire hasta  $50^\circ C$ , está en torno a los 100€-110€. [42]

-Los precios de los colectores solares de aire, varían en función de la superficie de éstos y de los materiales con los que están fabricados, pero de media oscilan entre los 450-500€ por metro cuadrado de superficie (precio incluyendo termostatos, cableado de conexiones, etc) por lo tanto si voy a colocar un colector de  $6 m^2$  me costará alrededor de los 3000€ [43]

-teniendo en cuenta que un secadero solar de unos  $4m^2$  de colector vale unos 5000 € [44] podemos decir que un secadero solar de  $6 m^2$  de colector rondará los 7500€.

-estimación de mano de obra (instalación y transporte): 950€

*Coste instalación:*

*ventilador + colector solar + secadero solar + mano de obra (estimada)*

*Estimación Coste instalación* =  $110€ + 3000€ + 7500€ + 950€ = 11560€$

éste valor es una estimación, pues depende de los precios exactos de mercado de los anteriores aparatos, en los que dependiendo de las características que queramos a la entrada, necesitaremos un ventilador más ó menos potente, un colector de + ó – superficie, etc, por lo que éste valor está sujeto a muchas condiciones.

## AHORRO ECONÓMICO

El ahorro económico saldrá cuando comparemos lo que nos cuesta conseguir la energía que aporta el colector en 1 día (dato calculado antes), con lo que nos cuesta la instalación, de ésta forma daremos un valor estimado del número de días que necesitaremos para amortizar la inversión inicial.

si el coste energético/ahorro económico al día eran 4.2 €/día y la inversión nos sale por 11590€, la amortización ó tiempo de retorno de la inversión será:

$$\begin{aligned} \text{Amortización} &= \frac{\text{inversión inicial}}{\text{ahorro}} = \frac{11560\text{€}}{\frac{4.2\text{€}}{\text{día}}} = 2752.38 \text{ días} \approx 2753 \text{ días} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} = \\ &= 7.54 \text{ años} \end{aligned}$$

la inversión inicial quedaría amortizada en 7 años y medio aproximadamente , a partir de ahí todo sería ahorro económico. Una vez que hemos amortizado la inversión inicial, los ahorros económicos irán aumentando a largo plazo. Tendríamos que descontar una parte para el mantenimiento de la instalación cada cierto tiempo.



# **Parte III**

# **CONCLUSIONES**

-Los parámetros que influyen en el proceso de secado de microalgas con aire forzado, no son independientes unos de otros, pues influyen en el resultado final del secado como un conjunto de factores y no aisladamente. La explicación se encuentra en que el efecto que puede tener un parámetro sobre una temperatura ó humedad depende directamente del valor del resto de parámetros. El manejo y control adecuado de éstos permitirá controlar varios aspectos, como obtener las características deseadas en las microalgas en función del uso posterior que se les vaya a dar, qué dimensiones costes de la instalación voy a tener, ahorro económico y energía aportada, etc.

-En un proceso de secado solar de microalgas el aire es el principal agente para absorber la humedad contenida en ellas. Cuanto mayor sea la temperatura de éste a la salida del colector, mayor será a la entrada de la cámara de secado, por tanto mayor será la capacidad para absorber la humedad del alga y menos tiempo necesitaremos para secar una determinada cantidad de algas. Un recorte en el tiempo supondrá secar más cantidad de algas en un mismo periodo, y dependiendo del uso al que se destinen reportarán beneficios económicos antes. Esto nos lleva a la conclusión de que el secado solar y en consecuencia éste tipo de tecnología, es más rentable en zonas del planeta con más horas de sol, donde las temperaturas ambiente e irradiaciones medias a lo largo del año sean más elevadas de lo normal.

-Como valoración energética y económica se puede destacar que considerando el caso práctico planteado, el colector solar de aire con las características descritas aporta más de 32 kWh al día, lo que supone un ahorro económico de más de 4€ diarios. Si se decidiera instalar un sistema de secado solar con un colector solar de aire integrado, se estima que la inversión inicial rondaría los 11000€, pero con el ahorro que se consigue dicha inversión se podría recuperar aproximadamente en unos 7 años y medio.

-Los mayores inconvenientes del uso de colectores solares para el secado son su coste, que junto con el secadero solar suponen una elevada inversión inicial, sin embargo, el periodo de cultivo de las microalgas es muy corto, y se ve favorecido en épocas en las que incide mayor cantidad de radiación solar, hecho que dará temperaturas del aire a la salida del colector mayores. Por lo tanto la combinación de la tecnología de secado solar con las microalgas puede resultar más rentable de lo normal, aunque sigue siendo de vital importancia analizar con sumo cuidado el dimensionamiento, la localización y en definitiva la rentabilidad de dicha instalación para ver si es viable.

-Se abre un gran abanico de posibilidades con el modelado del proceso de secado de productos: se van a desarrollar diseños térmicos más económicos y eficientes que mejoren la calidad del producto final obtenido, la durabilidad de los equipos, etc. Con éste tipo de investigaciones se podrá valorar, antes de hacer una inversión, qué tipo de secador es el más adecuado para una zona geográfica u otra, qué dimensiones son las más rentables si tenemos distintas condiciones a la entrada ó si queremos un producto final más o menos seco, cuánta energía produciré y cuál será mi ahorro económico a largo plazo, etc. Nos permitirá poder llevar un control de las pérdidas de humedad, una mayor seguridad al proceso, conseguiremos rendimientos adecuados para comercializar las instalaciones estudiadas, aplicaciones del modelo en procesos similares y futuras investigaciones, etc.

-Una posible mejora del trabajo sería realizar una discretización bidimensional, añadiendo al tiempo el dominio del espacio, pues la longitud de la bandeja también afecta al proceso de secado, así se conseguiría un modelo matemático más completo.

# **Parte IV**

# **BIBLIOGRAFÍA**

## Referencias

- [1] ***“A Realistic Technology and Engineering Assessment of Algae Biofuel Production”*** Lundquist T.J., Woertz I.I., Quinn N.W.T., Benemann J.R. , Energy Biosciences Institute, University of California, 2010.
- [2] ***“Illustrations of the Japanese Fresh-Water Algae”*** Masaru Akiyama. Uchidarokakuhoh Publishing Co., Tokyo, 1977.
- [3] ***“Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis and Bioseparation”*** Flickinger M.C., Stephen W.D., A Wiley-Interscience Publication, 1999.
- [4] ***“Perspectives on microalgal CO<sub>2</sub>-emission mitigation systems”*** Shin-Hsin Ho, Chun-Yen Chen, Duu-Jong Lee, Jo-Shu Chang. Biotechnology Advances, Volume 29, Issue 3, Pages 189-198, 2010.
- [5] ***“Experimental study capturing CO<sub>2</sub> greenhouse gas by ammonia scrubbing”*** Diao Y.F., Zheng X.Y., He B.S., Chen C.H., Xu X.C. .Energy Conversion and Manadgement, Volume 45, Issues 13-14, Pages 2283-2296, 2004.
- [6] ***“What future for carbon capture and sequestration?”*** Herzog H., Environ Science and Technology, Volume 35, Issue 7, Pages 148-153, 2001.
- [7] ***“An updated assessment of the acute impacts of ocean carbon sequestration by direct injection”*** Israelsson P.H., Chow A.C., Adams E.E.. Energy Procedia, Volume 1, Issue 1, Pages 4929-4936, 2009.
- [8] ***“Modelling of growth conditions for cyanobacterium Spirulina platensis in microcosms”*** Costa J., Linde G., Atala D.,. World Journal of Microbiology and Biotechnology, Volume 16, Number 1, Pages 15-18, 2000.
- [9] ***“Microalgae in agriculture”*** Metting B., Microalgal Biotechnology, Cambridge University Press, Cambridge, Pages 288- 304, 1988.
- [10] ***“Bericht über versuche zur fettsynthese mittels autotropher Mikroorganismen”*** Harder R., von Witsch H., , Forschungsdienst 16, 270-6, 1942.
- [11] ***“Fuel versus food”*** Chakravorty U., Hubett M.H., Nostbakken L., The annual Review of Resource Economics, 1(23), Pages 1-19, 2009.
- [12] ***“Commercialization potential of microalgae for biofuels production”*** Singh J., Gu S., Renewable and Sustaibale Energy Reviews, Volume 14, Issue 9, Pages 2596-2610, 2010.
- [13] ***“CO<sub>2</sub> biomitigation using microalgae”*** Wang B., Li Y.Q., Wu N., Lan C.Q., Applied Microbiology and Biotechnology, Volume 79, Number 5, Pages 707-718, 2008.
- [14] ***“Efecto de la composición bioquímica de microalgas sobre el valor nutritivo de dos cepas de Artemia”*** Band Schmidt C.J., Instituto Politecnico Nacional, La Paz, 1999.
- [15] ***“Commercialization potential of microalgae for biofuels production”*** Jasvinder S., Gu S., Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 9, Pages 2596-2610, 2010.
- [16] ***“Produção de Bioetanol a Partir de Microalga Scenedesmus obliquus”*** Pereira J.R., Universidade Nova de Lisboa, 2011.

- [17] ***“Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short, middle and long-term”*** Hamelinck C.N., van Hooijdonk G., Faaij A.P.C., Biomass and Bioenergy, Volume 28, Issue 4, Pages 384-410, 2005.
- [18] ***“Biodiesel a partir de microalgas”*** Hernandez A., Vazquez R., Sanchez M.P., Serrano L., Martinez A., Biotecnología y Biotecnología, Volumen 13, Paginas 38-61, 2009.
- [19] ***“A look back at the U.S Department of Energy’s Aquatic Species Program-Biodiesel from algae”*** Benemann J.R., Dunahay T., Roessler P., Sheehan J., , U.S Department of Energy, 1998.
- [20] ***“Biodiesel from microalgae”*** Chisti Y., Biotechnology Advances, Volume 25, Pages 294-306, 2007.
- [21] ***“Secado de granos a altas temperaturas”***. Oficina Regional de la FAO para America Latina y el Caribe.
- [22] ***“Drying Solids: Principles, Clasification, and Selection of Dryers”*** McHill University. Montreal. Quebec, Canada.
- [23] ***“Secado de granos y secadoras”***. Carlos Alberto de Dios. Chile 1996
- [24] <http://www.agrowaste.eu/>
- [25] ***“Secado de granos: natural, solar y a bajas temperaturas”*** Oficina Regional de la FAO para America Latina y el Caribe.
- [26] ***“Mass Transfer operations”*** Traybal, 1987. Mc Graw Hill
- [27] ***“ITF, Ingeniería Térmica y de Fluidos”*** Universidad Carlos III Madrid
- [28] ***“SFIO, Simulación de flujos industriales por ordenador”*** Universidad Carlos III Madrid
- [29] [www.poscosecha.com](http://www.poscosecha.com)
- [30] ***ETW:*** <http://www.farmingmachine.es>
- [31] ***Ace Process Equipment***
- [32] ***Changzhou Chuangxin Drying Equipment CO.,LTD.***
- [33] <https://procesosbio.wikispaces.com/secado>
- [34] ***Grammer-solar*** <http://cms.grammer-solar.com/es/aire-solar/el-colector.html>
- [35] ***“Energías Renovables”*** Marcelo Izquierdo Millán. Universidad Carlos III Madrid
- [36] ***Soliclima***
- [37] ***“Simulation Modeling & Analysis”***, Law A.M., Kelton W.D., 1991, Second Edition, McGraw-Hill, New York.
- [38] ***“Engineering of Solar thermal processes”*** Duffie, Has. And John Beckman, William A. 2006 Wiley.

[39] *Journal “Bioresource Technology”* T. Viswanathan et al. vía Science Direct. nº126 (2012) 131–136

[40] <https://energyplus.net/weather>

[41] *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)*

[42] [www.salvadorescoda.com](http://www.salvadorescoda.com), [www.solarventi.es](http://www.solarventi.es), [www.solostocks.com/energía](http://www.solostocks.com/energía)

[43] *web climasolar, web grammersolar*

[44] *web conasolar*

[45] *“Fundamentos de la Transferencia de Calor”*. Frank P. Incropera y David P. DeWitt

## LECTURAS

- *“Termodinámica básica y aplicada”*- Isidoro Martínez
- *“Fundamentos de la Transferencia de Calor”*. Frank P. Incropera y David P. DeWitt

## APUNTES ASIGNATURAS UNIVERSIDAD CARLOS III MADRID

- Energías renovables
- Mecánica de fluidos
- Simulación de flujos industriales por ordenador
- Ingeniería Térmica y de Fluidos
- Calor y Frío Industrial

## EMPRESAS Y FABRICANTES

- Grammer Solar
- Climasolar
- Conasolar
- Salvador escoda
- Soliclima

# **Parte IV**

# **ANEXOS**

# Código del proceso programado en MATLAB®

Todos los cálculos anteriormente explicados, el desarrollo de las ecuaciones, el orden en que se ejecutan, las variables de entrada y las que dependen de otras, etc, han sido programadas en el código del software informático MATLAB®.

Esto ha permitido realizar los cálculos de forma instantánea y muy exacta, pudiendo repetir el proceso tantas veces como instantes  $p$  se indiquen al comienzo. Es un código que una vez ejecutado con las variables de entrada deseadas, genera datos y los almacena para que podamos utilizarlos cuando queramos en representaciones gráficas, tablas de datos, posteriores estudios e investigaciones, generación de base de datos de procesos de secado de microalgas, etc.

A su vez dicho código podrá ser modificado y mejorado para que pueda calcular nuevas variables de interés y al mismo tiempo aumentemos sus funciones.

```
load('horas.mat')
load('irradjunio.mat')
load('tempjunio.mat')
load('pfc10.mat')

%rendimiento estándar de los colectores solares
rend=0.75;
%area del colector en metros cuadrados
Acolector=6;
%Tinicial lodo de algas, en grados centigrados
Tpini=15
%propiedades del agua que suponemos cte
dagua=1000
Cpagua=4180
%flujo másico para cada bandeja
flujom=0.075
%numero de bandejas en paralelo
batch=4
%flujo másico de aire en el colector
flujomcolector=batch*flujom
%dimensiones secador tunel
W=1
H=0.03
esp=0.03
At=3
Ax=1
%otras propiedades
waini=7.5e-3
hv=2.257e6
%instantes de tiempo
p=3
%temperatura a la salida del colector,inicializamos tamaño
Tout=zeros(24,1);
%poder calorifico del aire que entra al colector, depende de la T
Cpairecol=zeros(p,1);
for i=1:24;
    Cpairecol(i)=(0.07*Tjunio(i))+984.689999;
end
```



```

%rellenamos el vector temperatura a la salida, segun las horas del dia
for i=1:24;

    Tout(i)=((rend*Acolector*Ijunio(i))/(flujomcolector*Cpairecol(i))
    +Tjunio(i);
end
%pasamos las unidades a segundos y nos quedamos son sólo los datos desde
%una hora en concreto
timesec=horas*3600;
Tcolector=Tout(7:24);
timecol=timesec(7:24)-timesec(7);
ccol=polyfit(timecol,Tcolector,5);
Toutcol=zeros(p,1);
time=zeros(p,1);
time(1)=timecol(1);
Toutcol(1)=(ccol(1)*(time(1)^5)+(ccol(2)*(time(1)^4)+(ccol(3)*(time(1)^3))
+(ccol(4)*(time(1)^2)+(ccol(5)*(time(1)))+ccol(6);
for i=2:p+1
    time(i)=At+time(i-1);
    Toutcol(i)=(ccol(1)*(time(i)^5)+(ccol(2)*(time(i)^4)+(ccol(3)*(tim
e(i)^3)+(ccol(4)*(time(i)^2)+(ccol(5)*(time(i)))+ccol(6);
end
d1=zeros(p,1);
d2=zeros(p,1);
d3=zeros(p,1);
%inicializamos el vector tiempo de secado, en segundos
t=zeros(p,1);
t(1)=0;
%inicializamos otro vector donde se van metiendo las derivadas
calculadas
Deriv=zeros(p,1);
%inicializamos un vector que tendrá las humedades del alga que vamos
calculando
HUM=zeros(p,1);
%empezamos inicializando el primer valor de la humedad de entrada=1
HUM(1)=1;
%resto de variables
Vp=W*A*x*esp;
ap=1/esp;
Vc=H*W*A*x;
Va=Vc-Vp;
S=H*W;
Area=S-(esp*W);
Dh=4*((Area)/((2*W)+(2*(H-esp)))));
AC=ap*(1-esp);
daire=zeros(p,1);
visc=zeros(p,1);
Cpaire=zeros(p,1);
k=zeros(p,1);
Um=zeros(p,1);
Re=zeros(p,1);
Pr=zeros(p,1);
Nu=zeros(p,1);
hc=zeros(p,1);
C=zeros(p,1);
D=zeros(p,1);
G=zeros(p,1);
%iniciamos variables objetivo como vectores de tamaño p
nw=zeros(p,1);
wa=zeros(p,1);

```

```

Ta=zeros(p,1);
Tp=zeros(p,1);
%vector que recopila el tiempo de secado que se empleara en el proceso,
%se' un At y numero de instantes p
tiemposecl=zeros(p,1);
tiemposecl(1)=0;
A=zeros(p,1);
AB=zeros(p,1);
B=zeros(p,1);
E=zeros(p,1);
F=zeros(p,1);
H=zeros(p,1);
I=zeros(p,1);
J=zeros(p,1);
K=zeros(p,1);
L=zeros(p,1);
M=zeros(p,1);
Taire=zeros(p,1);
for i=1:p+1
    Taire(i)=Toutcol(i);
    %Taire(i)=313;
    Talga=Tpini+273;
    %calculo de los coeficientes d1,d2 y d3 en función de la T, para
    %calcular la expresión de la derivada
    d1(i)=(coefd1(1)*(Taire(i)^2))+(coefd1(2)*Taire(i))+coefd1(3);
    d2(i)=(coefd2(1)*(Taire(i)^2))+(coefd2(2)*Taire(i))+coefd2(3);
    d3(i)=(coefd3(1)*(Taire(i)^2))+(coefd3(2)*Taire(i))+coefd3(3);
    %cálculo de la derivada, para el valor inicial de humedad
    Deriv(1)=(d1(1)*(HUM(1)^2)) + (d2(1)*HUM(1)) + d3(1);
end
%repetimos tantas veces como indiquemos según el valor del instante p
for i=2:p+1
    t(i)=At+t(i-1);
    HUM(i)=(Deriv(i-1)*At)+HUM(i-1);
    Deriv(i)=(d1(i)*(HUM(i)^2)) + (d2(i)*HUM(i)) + d3(i);
end
for i=1:p
    %cálculo de las propiedades del aire que dependen de la T de entrada
    daire(i)=((-0.0032165)*Taire(i))+2.1358194;
    %a 50 grados daire=1.093;
    visc(i)=(0.000000045*Taire(i))+0.00000506;
    %a 50 grados visc=0.00001961;
    Cpaire(i)=(0.07*Taire(i))+984.68999;
    %a 50 grados Cpaire=1007;
    k(i)=((0.00007115)*Taire(i))+0.0047995;
    %a 50 grados k=0.02780;

    Um(i)=flujom/(daire(i)*Area);
    Re(i)=(flujom*Dh)/(visc(i)*Area);
    Pr(i)=Cpaire(i)*visc(i)/k(i);
    Nu(i)=0.11*(Re(i)^0.71)*(Pr(i)^(1/3));
    hc(i)=k(i)*Nu(i)/Dh;
    C(i)=flujom/(daire(i)*Va);
    D(i)=(hc(i)/(Cpaire(i)*daire(i)*esp))*ap*(1-esp);
    G(i)=(hc(i)*ap)/(dagua*Cpagua);
end
%valores iniciales para cada vector de las variables objetivo
%1) nw
AB(1)=(HUM(2)-HUM(1))/At;
nw(1)=- (AB(1)*dagua)/ap;
%2) wa

```

```

A(1)=(At/Ax)*(flujom/(daire(1)*esp*S));
wa(1)=( (A(1)*waini)+((At/(daire(1)*esp))*nw(1)*AC)+waini)/(1+A(1));
%3) Tp y Ta
B(1)=Taire(1)/At;
E(1)=B(1)+(C(1)*Taire(1));
F(1)=C(1)+D(1)+(1/At);
H(1)=(nw(1)*ap*hv)/(dagua*Cpagua);
I(1)=Talga/At;
J(1)=(-H(1))+I(1);
K(1)=(G(1)*E(1))/F(1);
L(1)=(G(1)*D(1))/F(1);
M(1)=(1/At)+G(1);
Tp(1)=(K(1)+J(1))/(M(1)-L(1));
Ta(1)=(E(1)+(D(1)*Tp(1)))/F(1);
%calculamos el resto de valores de los vectores de las variables,
%recorriendo cada instante p
for i=2:p

    tiemposecl(i)=At*i;

    %1) calculamos ratio de humedad en el producto nw
    AB(i)=(HUM(i+1)-HUM(i))/tiemposecl(i);
    nw(i)=-(AB(i)*dagua)/ap;
    %2) calculamos entonces el valor de wa
    A(i)=(tiemposecl(i)/Ax)*(flujom/(daire(i)*esp*S));
    wa(i)=( (A(i)*waini)+((tiemposecl(i)/(daire(i)*esp))*nw(i)*AC)+wa(i
    -1))/(1+A(i));
    %3) calculamos entonces el valor de Tp y Ta
    B(i)=Ta(i-1)/tiemposecl(i);
    E(i)=B(i)+(C(i)*Taire(i));
    F(i)=C(i)+D(i)+(1/tiemposecl(i));
    H(i)=(nw(i)*ap*hv)/(dagua*Cpagua);
    I(i)=Tp(i-1)/tiemposecl(i);
    J(i)=(-H(i))+I(i);
    K(i)=(G(i)*E(i))/F(i);
    L(i)=(G(i)*D(i))/F(i);
    M(i)=(1/tiemposecl(i))+G(i);
    Tp(i)=(K(i)+J(i))/(M(i)-L(i));
    Ta(i)=(E(i)+(D(i)*Tp(i)))/F(i);
end

```

# HOJA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS VENTILADOR

**SALVADOR ESCODA S.A.**  
www.salvadorescoda.com  
Provença, 392 pl. 2  
08025 BARCELONA  
Tel. 93 446 27 80  
Fax 93 456 90 32

**TARIFA DE PRECIOS**  
I.V.A. NO INCLUIDO. CONSULTE POSIBLES ACTUALIZACIONES

## 10 VENTILADOR HELICOIDAL DE PARED

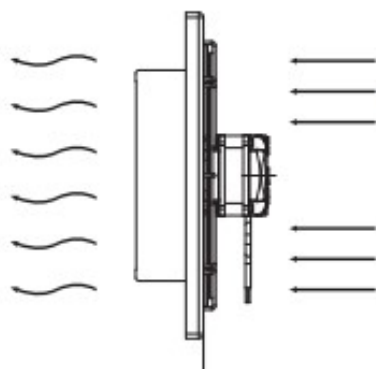


### Aplicaciones

- Montaje directo a pared
- Indicado para:
  - ventilación en general
  - aspiración
  - renovación de ambientes viciados

### Características

- Marco soporte de chapa acero galvanizado recubierto de pintura epoxy
- Hélice de chapa aluminio
- Rejilla de protección según norma UNE-EN 294
- Motor asíncrono según norma protección IP42
- Tensión 230V 50 Hz
- Temperatura máxima del aire 50°C
- Revoluciones del motor: 1.300 r.p.m.



### • Serie HPMF

**1.300 R.P.M.**  
aproximadamente

Código	Modelo	W	Son. dB(A)	Caudal m³/h	€
VE 10 801	HPMF 200 M4	30	37	330	83,00
VE 10 802	HPMF 250 M4	56	42	700	94,00
VE 10 803	HPMF 300 M4	77	47	1250	109,00
VE 10 804	HPMF 350 M4	80	50	1680	130,00

### Curvas de rendimiento:

